

## سنز شبکه تبادلهای حرارتی با استفاده از ترکیب یک الگوریتم اکتشافی با یک الگوریتم قطعی

امید محمدی<sup>۱</sup>، احمد جامه خورشید<sup>۲\*</sup>

<sup>۱</sup> سازمان انرژی اتمی ایران، دفتر ایمنی هسته‌ای، ایران

mohammadi.omid65@gmail.com

<sup>۲</sup> استادیار دانشکده مهندسی نفت، گاز و پتروشیمی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

jamekhorshid@pgu.ac.ir

**چکیده:** یکی از مسائل مهمی که در بهینه کردن هزینه‌های یک فرایند نقش عمده‌ای دارد، بهینه کردن میزان مصرف واحد پشتیبانی (بخار و آب سرد) است. با این هدف شبکه تبادلهای حرارتی در یک فرایند مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای این منظور از دیرباز روش‌های متعددی ارائه شده که مهم‌ترین آن‌ها روش پینچ است. الگوریتم‌های اکتشافی نیز اخیراً برای این هدف مورد استفاده زیادی قرار گرفته‌اند. در این پژوهش، ترکیب الگوریتم تصادفی اجتماع مورچگان و یک الگوریتم قطعی برای پیدا کردن شبکه تبادلهای حرارتی بهینه ارائه شده است. الگوریتم اجتماع مورچگان از ابتدا به منظور بهینه‌سازی مسائل گسسته معرفی شد و در این پژوهش نیز از آن در همین جهت استفاده شده است. برای به اثبات رساندن کارایی روش ارائه شده دو مسئله نمونه مورد بررسی قرار گرفته‌اند و نتایج به دست آمده توسط الگوریتم پیشنهادی با داده‌های مقالات مقایسه شده است.

**واژه‌های کلیدی:** بهینه‌سازی، الگوریتم اجتماع مورچگان، شبکه تبادلهای حرارتی، الگوریتم نلدر-مید.

## ۱. مقدمه

هیچگاه جامعیت جواب به دست آمده را برای مسئله مورد نظر تضمین نمی‌کنند. در این مقاله سعی بر این است تا با ترکیب یک الگوریتم اکتشافی و یک الگوریتم قطعی برای حل مسئله، در عین حال که از مزایای هر دو نوع الگوریتم استفاده می‌شود، کاستی‌های هر دو نیز جبران شود.

در مرحله اول، الگوریتم اکتشافی - در اینجا الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع مورچگان (ACO<sup>۹</sup>) می‌باشد. یک شبکه تبادلهای حرارتی برای فرایند مورد نظر انتخاب می‌کند و در مرحله دوم پارامترهای شبکه انتخاب شده اعم از بار روی هر تبادلهای، میزان انشعابات (در صورت نیاز) و... توسط الگوریتم قطعی نلدر-مید<sup>۱۰</sup> بهینه می‌شوند. الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع مورچگان اولین بار در سال ۱۹۹۲ توسط دوریگو<sup>۱۱</sup> برای حل مسائل دارای متغیرهای گسسته ارائه شد. در سال‌های اخیر پیشرفت‌های متعددی روی الگوریتم انجام شده و از آن برای حل مسائل مختلف مهندسی شیمی استفاده‌های مکرری شده است. برای مثال در برنامه‌ریزی سیستم‌های ناپیوسته چند محصولی [۱۴]، کنترل بهینه [۱۵]، سنتر شبکه استخراج‌کننده‌های مایع-مایع [۱۶] و بهینه‌سازی خطوط انتقال گاز از پالایشگاه تا مراکز مصرف [۱۷] از این الگوریتم استفاده شده است. در این پژوهش با بررسی یک شبکه تبادلهای حرارتی توسط الگوریتم ارائه شده و مقایسه جواب‌های به دست آمده آن با مقالات میزان صحت و دقت الگوریتم مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲. روش حل

یک مسئله سنتر HEN عبارت است از یک سیستم با  $n_H$  جریان گرم با دمای ورودی داده شده که باید تا یک دمای مشخص سرد شوند،  $n_C$  جریان سرد با دمای ورودی داده شده که باید تا یک دمای مشخص گرم شوند، به همراه داده‌های ظرفیت گرمایی جریان‌ها. برای این سیستم لازم است شبکه تبادلهای بهینه‌ای به همراه بار هر کدام تعریف شود؛ به طوری که بازیافت حرارت از جریان‌های گرم به جریان‌های سرد ماکزیم شود تا بدین وسیله بار روی تبادلهای واحد پشتیبانی کمینه شود و در نهایت هزینه‌های جاری فرایند کاهش پیدا کند. به طور کلی تابع هدف مسئله به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$C_{Global} = [C_{HU} \times HU + C_{CU} \times CU] + \sum_k^{unit} (a + b \times A_k^c) \quad (1)$$

$a$  و  $b$  پارامترهای ثابتی هستند برای محاسبه هزینه سرمایه‌ای تبادلهای و  $A_k^c$  مساحت لازم برای تبادلهای  $k$ ام است. لازم به ذکر است که در این پژوهش برای  $\Delta T_{min}$  محدودیتی قائل نمی‌شویم. این پارامتر در طول الگوریتم محاسبه می‌شود. اگر  $\Delta T_{min}$  کم باشد، از یک طرف

سنتر شبکه تبادلهای حرارتی (HEN<sup>۱</sup>) معمولاً با هدف مینیم کردن هزینه‌های سالیانه فرایندها صورت می‌گیرد. با استفاده از یک HEN بهینه برای جریان‌های موجود در یک فرایند مقدار زیادی از هزینه‌های مربوط به واحد پشتیبانی اعم از هزینه بخار، هزینه آب سرد و هزینه دستگاه‌های گرم‌کننده و سردکننده ذخیره می‌شود، ولی در مقابل هزینه سرمایه‌ای تبادلهای فرایندی افزایش می‌یابد. در واقع هدف از سنتر HEN برقرار کردن موازنه بین این دو وجه مخالف و در نهایت پایین آوردن هزینه کلی فرایندها می‌باشد. به خاطر اهمیت موضوع طی سه دهه اخیر این مقوله مورد مطالعه زیادی قرار گرفته است. از دیرباز سه راهبرد برای سنتر شبکه تبادلهای حرارتی مورد توجه قرار گرفته است که عبارت‌اند از: ۱. روش پینچ<sup>۲</sup>؛ که بر پایه مفاهیم ترمودینامیکی است و مفاهیم آن در مقالات و کتب متعددی آورده شده است [۱ و ۲]. ۲. روش بهینه‌سازی ریاضی؛ که خود به دو دسته پشت سرهم و همزمان قابل تفکیک است. در روش سنتر پشت سرهم، مسئله به یک سری قسمت‌های کوچک‌تر در بازه‌های دمایی متفاوت شکسته شده و حل می‌شود. عموماً در این روش با مسائل MILP<sup>۳</sup> سروکار خواهیم داشت [۳ و ۴]. در روش سنتر همزمان، شبکه بهینه بدون شکستن مسئله جستجو می‌شود و معمولاً منجر به یک مسئله MINLP<sup>۴</sup> می‌شود [۵ و ۶]. اگرچه روش دوم به نسبت روش پشت سرهم به جواب بهتری منجر می‌شود، ولی مشکل بزرگ شدن و غیر قابل حل شدن مسئله را داراست. به طور کلی ثابت شده است که سنتر HEN در زیرمجموعه مسائل NP-Hard<sup>۵</sup> قرار می‌گیرد که حل آن‌ها دارای پیچیدگی‌های بخصوصی است. با به مشکل برخوردن حل مسئله با دو روش گفته شده تلاش‌ها منجر به روش حل دیگری شد؛ ۳. روش‌های بهینه‌سازی اکتشافی؛ الگوریتم‌های اکتشافی متفاوتی روی مسئله سنتر HEN مورد آزمون قرار گرفته‌اند و به جواب‌های خوبی نیز دست یافته‌اند که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از: الگوریتم‌های ژنتیک [۷-۹]، الگوریتم SA<sup>۱</sup> [۱۰ و ۱۱]، الگوریتم TS<sup>۷</sup> [۱۲] و الگوریتم ANN<sup>۸</sup> [۱۳]. این روش‌ها توانایی کار روی مسائل خیلی بزرگ را دارند، در مورد غیر خطی بودن مسئله محدودیت ندارند و همچنین محدودیت ناپیوستگی مدل را نیز ندارند. اگرچه این روش‌ها دارای قابلیت‌های زیادی هستند و به راحتی جوابی نزدیک به جواب بهینه را در زمانی معقول به دست می‌دهند ولی

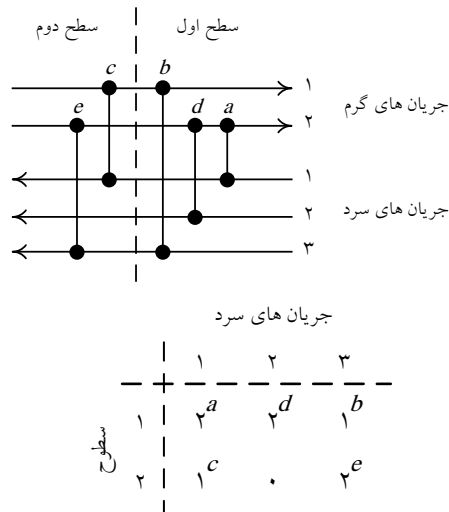
1. Heat Exchanger Network
2. Pinch Method
3. Mixed Integer Linear Problem
4. Mixed Integer Non-Linear Problem
5. Non-deterministic Polynomial-time Hard
6. Simulated Annealing
7. Tuba Search
8. Artificial Neural Network

9. Ant Colony Optimization Algorithm  
10. Nelder-Mead Method  
11. Dorigo

چند تکرار و انجام گرفتن تعداد مشخص تکرار در الگوریتم مهم‌ترین‌ها هستند که در این پژوهش از راهکار سوم استفاده شده است.

### ۳. نمایش ساختار شبکه تبادله‌گرها در الگوریتم

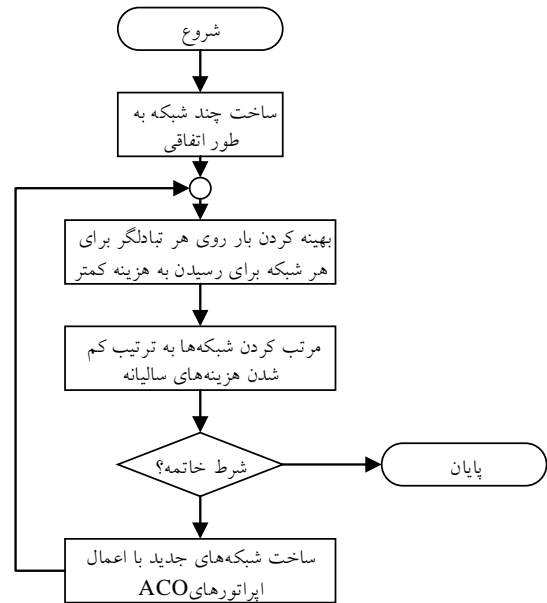
یکی از مسائل مهم در سنتز HEN، طرز نشان دادن ساختار شبکه در الگوریتم است. نمایش ساختار باید دارای خصوصیات ویژه‌ای باشد، از جمله اینکه دارای مفهوم فیزیکی باشد، به راحتی قابل فهم باشد، الگوریتم بهینه‌کننده پارامترهای ساختار بتواند به راحتی با آن کار کند و در نهایت الگوریتم اجتماع مورچگان نیز بتواند اپراتورهای خود را روی آن پیاده کند. برای این منظور لوین و همکاران مفهوم سطح را معرفی کردند [۸]. همان‌طور که در شکل (۲) نشان داده شده، هر سطح شامل تعدادی تبادله‌گر است که بین جریان‌های گرم و سرد عمل می‌کنند.



**شکل (۲): نحوه نشان دادن ساختار شبکه در الگوریتم (ماتریس انتشار)**  
 در این مدل، یکی از جریان‌ها (گرم یا سرد) به عنوان جریان کلیدی و دیگری به عنوان جریان غیرکلیدی در نظر گرفته می‌شود. ساختار HEN توسط ماتریس برخورد نشان داده شده در شکل (۲) نمایش داده می‌شود. در این ماتریس تعداد سطرها نشان‌دهنده تعداد سطوح در نظر گرفته شده و تعداد ستون‌ها نشان‌دهنده تعداد جریان‌های کلیدی است. درایه غیر صفر  $k$  در مکان  $(i, j)$  ماتریس انتشار، نشان‌دهنده این موضوع است که جریان کلیدی  $j$  ام در سطح  $i$  ام با جریان غیرکلیدی  $k$  ام دارای ارتباط حرارتی می‌باشد. اگر مقدار  $k$  صفر باشد، به این مفهوم است که جریان کلیدی  $j$  ام با هیچ جریان غیرکلیدی در سطح  $i$  ام ارتباط حرارتی ندارد. قانونی که در ساختن ماتریس انتشار توسط الگوریتم اکتشافی در نظر گرفته می‌شود بدین گونه است که در هر سطح، هر جریان غیر کلیدی این اجازه را دارد که با چند جریان کلیدی ارتباط حرارتی داشته باشد ولی عکس این موضوع صادق نیست. با این قانون از به وجود آمدن حلقه (دور) در شبکه جلوگیری می‌شود. حال ماتریس انتشار باید به صورتی

هزینه بخار و آب سرد کاهش پیدا می‌کند و از طرف دیگر مساحت تبادله‌گرها افزایش می‌یابد، پس برای این پارامتر مقدار بهینه‌ای وجود دارد به نحوی که هزینه کلی شبکه مینیمم شود. چون هدف الگوریتم مینیمم کردن هزینه است، پس این متغیر خود به خود در طول الگوریتم بهینه می‌شود.

همان‌طور که گفته شد، در اینجا مسئله سنتز طی دو مرحله انجام می‌شود: در مرحله اول ساختار تبادله‌گرها مشخص می‌شود و در مرحله دوم پارامترهای ساختار بهینه می‌شوند. در شکل (۱) نمای کلی الگوریتم مشاهده می‌شود. قابل ذکر است که در این پژوهش امکان انشعاب جریان‌ها فعلاً در نظر گرفته نشده است و الگوریتم قطعی فقط بار روی تبادله‌گرها را بهینه می‌کند و در نتیجه با یک مسئله LP<sup>۱</sup> سروکار دارد و بنابراین از روش‌های ساده‌ای مثل سیمپلکس<sup>۲</sup> می‌توان به عنوان الگوریتم قطعی استفاده کرد. بهینه‌سازی در مرحله اول در فضای متغیرهای غیرپیوسته صورت می‌گیرد که الگوریتم ACO اساساً از ابتدا برای این منظور ابداع شده است. هر ساختاری که از مرحله اول خارج می‌شود، به مرحله دوم فرستاده می‌شود تا بار هر تبادله‌گر برای رسیدن به هزینه سالیانه مینیمم محاسبه شود.



شکل (۱): نمای کلی ترکیب دو الگوریتم

جواب به دست آمده به مرحله اول بازگشت داده می‌شود تا الگوریتم اکتشافی به کمک آن ساختار دیگری را پیشنهاد دهد و بدین ترتیب الگوریتم کلی به یک ساختار بهینه برای فرایند میل کند. راه‌های متفاوتی برای تعریف شرط خاتمه الگوریتم پیشنهاد شده که از بین آن‌ها رسیدن به یک جواب ویژه توسط الگوریتم، تغییر نکردن جواب به دست آمده طی

1. Linear Problem
2. Simplex Method

(۱۷) بیان می‌شود. چگونگی وابستگی مسیر حرکت به این دو عامل در الگوریتم‌های مختلف ACO متفاوت است. در این پژوهش از روش سیستم اجتماع مورچگان (ACS) استفاده شده است. در ACS حرکت مورچه در مسیر به پارامتر  $q_0$  بستگی دارد که عددی بین صفر و یک است. هر چه  $q_0$  بزرگ‌تر انتخاب شود بدین معنی است که مورچه‌ها از یافته‌های قبلی خود بیشتر استفاده می‌کنند تا اینکه بخواهند دنبال راه‌های جدید بروند. در هر زمان مورچه‌ای که در شهر  $i$  قرار دارد طبق قانون زیر شهر  $j$  را برای حرکت بعدی خود انتخاب می‌کند؛

$$j = \begin{cases} \operatorname{argmax}_{u \in J_i^k} \left[ (\tau_{iu}(t))^\alpha (\eta_{iu})^\beta \right] & \text{if } q \leq q_0 \\ J & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

$\alpha$  و  $\beta$  پارامترهای نشان‌دهنده اهمیت مقدار فرومون نسبت به قابلیت دید هستند.  $\alpha$  برابر یک و  $\beta \geq 0$  است که در مسئله ما برابر صفر در نظر گرفته شده است.  $q$  عددی تصادفی بین صفر و یک است و  $J$  یک شهر تصادفی است که طبق احتمال زیر برگزیده می‌شود؛

$$P_{ij} = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{u \in J_i^k} [\tau_{iu}(t)]^\alpha [\eta_{iu}]^\beta} & \text{for } j \in J_i^k \\ 0 & \text{for } j \notin J_i^k \end{cases} \quad (3)$$

متغیر  $\eta$  در ابتدای حرکت مورچه‌ها محاسبه می‌شود و تا آخر تغییر نمی‌کند، ولی مقدار فرومون به دو صورت تغییر می‌کند: یکی در حین ساخت جواب توسط همه مورچه‌ها (به‌روز کردن محلی) با فرمول زیر:

$$\tau_{ij} = (1 - \rho)\tau_{ij}(t) + \rho\tau_0 \quad (4)$$

دیگری بعد از اتمام هر تکرار توسط باهوش‌ترین مورچه با فرمول زیر:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho)\tau_{ij}(t) + \rho\Delta\tau_{ij}(t) \quad (5)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \frac{1}{L^+} \quad (6)$$

پارامتر  $\rho$  ضریب تخیر فرومون است که اگر وجود نداشته باشد ممکن است کلونی<sup>۲</sup> سریعاً به سمت یک جواب نیمه میل کند.  $L^+$  مقدار جواب به دست آمده توسط باهوش‌ترین مورچه است. به این ترتیب به نسبت بزرگ بودن مسئله با انجام چند تکرار کلونی به سمت جواب بسیار خوبی میل می‌کند.

## ۵. مطالعه موردی

در اینجا سعی شده با سنتر دو شبکه به‌عنوان نمونه و مقایسه جواب مقالات، میزان کارایی الگوریتم نمایش داده شود. الف. این شبکه از مقاله نیلسن [۱۸] گرفته شده است. مسئله شامل دو

تبدیل شود که توسط الگوریتم‌ها قابل استفاده باشد. لوین ماتریس نشان داده شده در شکل (۲) را که متعلق به ساختار همان شکل است به صورت [۲،۲،۱،۱،۰،۲] نمایش داده است. پیشنهاد این پژوهش این است که از مدل دیگری استفاده شود که هم کارایی بالاتر و هم راحتی بیشتری را داراست. مدل ارائه شده بدین ترتیب است که ساختار شبکه شکل (۲) به صورت بردار [۲،۲،۱،۱،۲،۱،۳،۱،۳] نمایش داده می‌شود. این بردار دو برابر تعداد درایه‌های غیرصفر ماتریس انتشار عضو دارد که نیمه اول آن [۲،۲،۱،۱،۲] شماره جریان‌های غیر کلیدی است که به ترتیب از راست به چپ در تبادلگرها مورد استفاده قرار گرفته‌اند، همچنان‌که به همان ترتیب نیمه دوم بردار مذکور شماره جریان‌های کلیدی مورد استفاده در ساختار است.

## ۴. الگوریتم ACO

جوامع حشرات اجتماعی به‌طور کل و اجتماع مورچگان به‌طور خاص سیستم‌های گسترده‌ای هستند که علی‌رغم ساده بودن تک‌تک افراد این جوامع، نظام اجتماعی بسیار پیچیده‌ای دارند و باعث شده‌اند از رفتار آن‌ها برای استفاده در علوم مختلف الگوبرداری شود. یکی از معروف‌ترین موفق‌ترین الگوریتم‌های الهام گرفته‌شده از رفتار اجتماع مورچه‌ها «بهینه‌سازی اجتماع مورچگان» است که از رفتار پی‌غذا گشتن مورچه‌ها الهام گرفته شده است و عموماً مسائل بهینه‌سازی گسسته را مورد بحث قرار می‌دهد. بررسی‌ها نشان داده‌اند که مورچه‌ها تا حدود زیادی نابینا هستند و بیشتر ارتباطات آن‌ها از طریق ماده شیمیایی است که از خود ساطع می‌کنند. این ماده فرومون<sup>۱</sup> نام دارد. همین رفتار فرومون‌گذاری و دنبال کردن رد فرومون توسط مورچه‌های دیگر منبع الهام ACO شده است. برای توضیح الگوریتم، طرز پیاده شدن آن روی مسئله فروشنده دوره‌گرد آورده شده است. فروشنده دوره‌گرد قصد دارد از شهر خود شروع به حرکت کند، از تعدادی شهر عبور کند و دوباره به شهر خود بازگردد با این توضیح که از هیچ شهری دو بار عبور نکند و از همه شهرها هم گذشته باشد. هدف پیدا کردن مسیر فروشنده به شیوه‌ای است که طول مسیر هم کمینه شود.

در الگوریتم ACO ابتدا روی تمام مسیرهای موجود مقداری فرومون ریخته می‌شود، سپس تعدادی مورچه در سیستم قرار داده می‌شود. هر مورچه به‌طور اتفاقی روی یک شهر گذاشته می‌شود و حرکت می‌کند تا وقتی به شهر اولیه خود بازگردد. اینکه مورچه‌ای که در شهر  $i$  قرار دارد از بین شهرهای همسایه کدام شهر را برگزیند بستگی به دو عامل دارد: ۱. میزان فرومون ریخته‌شده ( $\tau$ ) روی مسیرهای موجود در اطراف شهر  $i$ . ۲. معکوس فاصله شهر  $i$  تا شهرهای اطراف، این مقدار با متغیر قابلیت دید

بار روی مبدل‌هاست که باعث تفاوت در هزینه شبکه‌هاست. شبکه موردنظر در شکل (۴) مشاهده می‌شود و همچنین مقایسه نتایج در جدول (۴) آورده شده است.

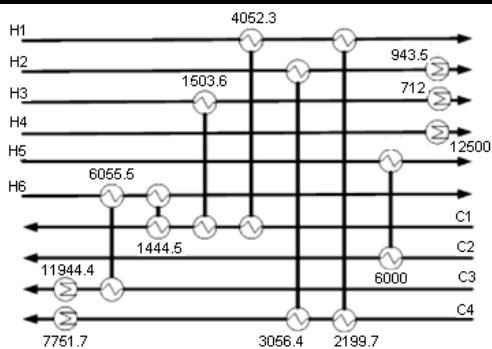
جدول (۳): داده‌های حرارتی و اقتصادی مطالعه موردی ب

جریان	$T^{in}$ (°C)	$T^{out}$ (°C)	FCp (kW/°C)
H1	۸۵	۴۵	۱۵۶/۳
H2	۱۲۰	۴۰	۵۰
H3	۱۲۵	۳۵	۲۳/۹
H4	۵۶	۴۶	۱۲۵۰
H5	۹۰	۸۶	۱۵۰۰
H6	۲۲۵	۷۵	۵۰
C1	۴۰	۵۵	۴۶۶/۷
C2	۵۵	۶۵	۶۰۰
C3	۶۵	۱۶۵	۱۸۰
C4	۱۰	۱۷۰	۸۱/۳
بخار	۲۰۰	۱۹۸	-
آب	۱۵	۲۰	-

$U = 0.025 \text{ kW/m}^2$ ;  
Annual cost = 60A;  
 $C_{HU} = 100 \text{ \$/kW year}$ ;  $C_{CU} = 15 \text{ \$/kW year}$ .

جدول (۴): مقایسه نتایج به‌دست‌آمده برای مسئله دوم

مرجع	واحد	$Q_H$ (kW)	$Q_C$ (kW)	هزینه سالانه (دلار)
[۲۲]	۱۳	۲۰۵۲۹	۱۴۹۲۴	۵۶۷۲۸۲۱
[۲۳]	۱۳	۲۰۷۴۵	۱۵۱۴۰	۵۶۶۶۷۵۶
[۲۱]	۱۲	۱۹۶۰۵	۱۴۰۰۰	۵۶۶۲۳۶۶
پژوهش حاضر	۱۲	۱۹۶۹۶	۱۴۰۹۱	۵۶۴۸۰۶۰



شکل (۴): شبکه تبادلگرهای به‌دست‌آمده برای مسئله دوم

### ۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، از ترکیب الگوریتم اجتماع مورچگان و الگوریتم قطعی نلد-ریمید (تابع  $fminsearch$  از نرم‌افزار MATLAB) برای سنتز شبکه تبادلگرهای حرارتی استفاده شد. آزمون الگوریتم برای حالتی که انشعاب جریان‌ها نیز در نظر گرفته به بعد موقوف شد. دو مسئله به‌عنوان نمونه با این ترکیب مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه جواب‌های به‌دست‌آمده با مقالات نشان داد که الگوریتم کارایی بالایی دارد و در مسائل نیمه‌صنعتی نیز می‌تواند در یک زمان بسیار خوب به جواب قابل قبولی برسد.

جریان گرم و دو جریان سرد است. در جدول (۱) داده‌های حرارتی و اقتصادی مسئله مشاهده می‌شود. تعداد سطوح برابر ۳ و جریان‌های سرد، جریان‌های کلیدی در نظر گرفته شده‌اند. نیلسن با ارائه شبکه شکل (۳) قسمت (ب) هزینه سالیانه شبکه را ۸۲۵۴ دلار برآورد کرده که با بهینه کردن بار روی تبادلگرها می‌توان هزینه را تا میزان ۷۳۰۰ کاهش داد. با طراحی شبکه شکل (۳) قسمت (ب) هزینه تا میزان ۶۸۸۴ دلار کاهش پیدا می‌کند. مقایسه جواب‌های به‌دست‌آمده با مقالات در جدول (۲) قابل مشاهده است.

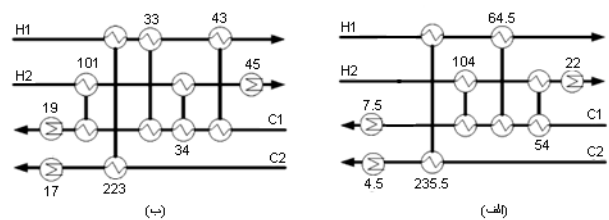
جدول (۱): داده‌های حرارتی و اقتصادی مطالعه موردی الف

جریان	$T^{in}$ (°C)	$T^{out}$ (°C)	FCp (kW/°C)
H1	۲۶۰	۱۶۰	۳
H2	۲۵۰	۱۳۰	۱/۵
C1	۱۲۰	۲۳۵	۲
C2	۱۸۰	۲۴۰	۴
بخار	۲۸۰	۲۷۹	-
آب	۳۰	۸۰	-

$U = 0.2 \text{ kW/m}^2$ ;  
Annual cost = 300A<sup>0.5</sup>;  
 $C_{HU} = 110 \text{ \$/kW year}$ ;  $C_{CU} = 12.2 \text{ \$/kW year}$ .

جدول (۲): مقایسه نتایج به‌دست‌آمده برای مسئله اول

مرجع	واحد	$Q_H$ (kW)	$Q_C$ (kW)	هزینه سالانه (دلار)
[۱۹]	۷	۵۰	۶۰	۸۴۶۰
[۲۰]	۸	۳۶	۴۵	۸۲۵۴
[۲۱]	۷	۱۸/۱	۲۸/۱	۶۹۶۷
پژوهش حاضر	۷	۱۲	۲۲	۶۸۸۴



شکل (۳): شبکه تبادلگرهای بهینه برای مسئله اول: الف. شبکه

به‌دست‌آمده در پژوهش حاضر؛ ب. شبکه نیلسن و همکاران

ب. در این قسمت مسئله راواگناتی و همکاران [۹] مورد بررسی قرار می‌گیرد. مسئله شامل ۶ جریان گرم و ۴ جریان سرد است. داده‌های حرارتی و اقتصادی مسئله در جدول (۳) آورده شده است.

برای این شبکه تعداد سطوح برابر ۴، و جریان‌های سرد به‌عنوان جریان‌های کلیدی در نظر گرفته شده‌اند. با این جزئیات بعد از مدت زمان ۳۲۲۰ ثانیه شبکه‌ای شبیه شبکه راواگناتی و همکاران [۹] و خراسانی و فسانقری [۲۱] به‌دست می‌آید. الگوریتم ارائه‌شده توسط خراسانی و فسانقری در مدت ۴۲۹۱ ثانیه به جواب رسیده است. تفاوت شبکه‌ها در

در الگوریتم ACS

$q_0$  ثابت نشان‌دهنده میزان استفاده از یافته‌های پیشین در

الگوریتم ACS

علائم یونانی

$\alpha$	ثابت نشان‌دهنده اهمیت مقدار فرمون
$\beta$	ثابت نشان‌دهنده اهمیت میزان دید
$\eta_{ij}$	میزان دید نقطه (شهر) $j$ از نقطه (شهر) $i$
$\rho$	میزان تبخیر فرمون
$\tau$	میزان فرمون ریخته‌شده
$\tau_0$	مقدار فرمون اولیه موجود روی مسیرهای مسئله
$\tau_{ij}$	مقدار فرمون موجود در مسیر بین نقاط $i$ و $j$

فهرست علائم

$a$	عدد ثابت برای به‌دست‌آوردن هزینه تبادلهای
$A_k^c$	سطح لازم برای تبادلهای $k$
$b$	عدد ثابت برای به‌دست‌آوردن هزینه تبادلهای
$c$	عدد ثابت برای به‌دست‌آوردن هزینه تبادلهای
$C_{CU}$	هزینه هر واحد آب سرد از واحد پشتیبانی
$C_{Global}$	هزینه کلی از واحد پشتیبانی
$C_{HU}$	هزینه هر واحد بخار از واحد پشتیبانی
$CU$	میزان مصرف آب سرد
$HU$	میزان مصرف بخار
$L^+$	مقدار جواب به‌دست‌آمده توسط باهوش‌ترین مورچه
$q$	عدد تصادفی نشان‌دهنده میزان استفاده از یافته‌های پیشین

مراجع

- [1] Linnhoff, B., Hindmarsh, E., "The Pinch Design Method for Heat Exchanger Networks", Chemical Engineering Science, Vol. 38, pp. 745-763, 1983.
- [2] Smith, R. M., "Chemical Process: Design and Integration", John Wiley & Sons, 2005.
- [3] Floudas, C. A., Ciric, A. R., Grossmann, I. E., "Automatic Synthesis of Optimum Heat Exchanger Network Configurations", AIChE Journal, Vol. 32, pp. 276-290, 1986.
- [4] Pouransari, N., Maréchal, F., "Heat Exchanger Network Design of Large-Scale Industrial Site with Layout Inspired Constraints", Computers & Chemical Engineering, Vol. 71, pp. 426-445, 2014.
- [5] Adjiman, C. S., Androulakis, I. P., Floudas, C. A., "Global Optimization of Mixed-Integer Nonlinear Problems", AIChE Journal, Vol. 46, pp. 1769-1797, 2000.
- [6] Onishi, V. C., Ravagnani, M., Caballero, J., "MINLP Model for the Synthesis of Heat Exchanger Networks with Handling Pressure of Process Streams", Comput Aided Chem Eng, Vol. 33, pp. 163-168, 2014.
- [7] Lewin, D. R., "A Generalized Method for HEN Synthesis Using Stochastic Optimization — II: The Synthesis of Cost-Optimal Networks", Computers & Chemical Engineering, Vol. 22, pp. 1387-1405, 1998.
- [8] Lewin, D. R., Wang, H., Shalev, O., "A Generalized Method for HEN Synthesis Using Stochastic Optimization — I. General Framework and MER Optimal Synthesis", Computers & Chemical Engineering, Vol. 22, pp. 1503-1513, 1998.
- [9] Ravagnani, M. A. S. S., Silva, A. P., Arroyo, P. A., Constantino, A. A., "Heat Exchanger Network Synthesis and Optimisation Using Genetic Algorithm", Applied Thermal Engineering, Vol. 25, pp. 1003-1017, 2005.
- [10] Athier, G., Floquet, P., Pibouleau, L., Domenech, S., "A Mixed Method for Retrofitting Heat-Exchanger Networks", Computers & Chemical Engineering, Vol. 22, Supplement 1, pp. S505-S511, 1998.
- [11] Peng, F., Cui, G., "Efficient Simultaneous Synthesis for Heat Exchanger Network with Simulated Annealing Algorithm", Applied Thermal Engineering, Vol. 78, pp. 136-149, 2015.
- [12] Lin, B., Miller, D. C., "Solving Heat Exchanger Network Synthesis Problems with Tabu Search", Computers & Chemical Engineering, Vol. 28, pp. 1451-1464, 2004.
- [13] Mohanraj, M., Jayaraj, S., Muraleedharan, C., "Applications of Artificial Neural Networks for Thermal Analysis of Heat Exchangers—A Review", International Journal of Thermal Sciences, Vol. 90, pp. 150-172, 2015.
- [14] Chunfeng, W., Xin, Z., "Ants Foraging Mechanism in the Design of Multiproduct Batch Chemical Process", Industrial & engineering chemistry research, Vol. 41, pp. 6678-6686, 2002.
- [15] Van Ast, J., Babuška, R., De Schutter, B., "Ant Colony Optimization for Optimal Control", IEEE World Congress on Computational Intelligence, pp. 2040-2046, 2008.
- [16] Papadopoulos, A. I., Linke, P., "On the Synthesis and Optimization of Liquid-Liquid Extraction Processes Using Stochastic Search Methods", Computers & Chemical Engineering, Vol. 28, pp. 2391-2406, 2004.
- [17] Cheboub, A., Yalaoui, F., Smati, A., Amodeo, L., Younsi, K., Tairi, A., "Optimization of Natural Gas Pipeline Transportation Using Ant Colony Optimization", Computers & Operations Research, Vol. 36, pp. 1916-1923, 2009.
- [18] Dorigo, M., Caro, G. D., "The Ant Colony Optimization Meta-Heuristic", in New ideas in optimization, C. David, D. Marco, G. Fred, D. Dipankar, M. Pablo, P. Riccardo, et al., Eds., ed: McGraw-Hill Ltd., UK, pp. 11-32, 1999.
- [19] Ahmad, S., "Heat Exchanger Networks: Cost Tradeoffs in Energy and Capital", University of Manchester Institute of Science and Technology (UMIST), 1985.
- [20] Nielsen, J. S., Hansen, M. W., bay Joergensen, S., "Heat Exchanger Network Modelling Framework for Optimal Design and Retrofitting", Computers & chemical engineering, Vol. 20, pp. S249-S254, 1996.
- [21] Khorasany, R. M., Fesanghary, M., "A Novel Approach for Synthesis of Cost-Optimal Heat Exchanger Networks", Computers & Chemical Engineering, Vol. 33, pp. 1363-1370, 2009.
- [22] Ravagnani, M., Silva, A., Arroyo, P., Constantino, A., "Heat Exchanger Network Synthesis and Optimisation Using Genetic Algorithm", Applied Thermal Engineering, Vol. 25, pp. 1003-1017, 2005.
- [23] Yerramsetty, K. M., Murty, C., "Synthesis of Cost-Optimal Heat Exchanger Networks Using Differential Evolution", Computers & Chemical Engineering, Vol. 32, pp. 1861-1876, 2008.