

توسعه الگوریتمی برای تعیین روش انتخاب وسیله‌های افزایش دهنده انتقال حرارت و بررسی تأثیر به کارگیری آن در تحقیقات اصلاحی شبکه مبدل‌های حرارتی

محمد رضا جعفری نصر*⁺

تهران، شرکت پژوهش و فناوری پتروشیمی، گروه پژوهش‌های غیر پلیمری، صندوق پستی ۱۴۳۵۸

مهدي شاهرودي

تهران، شرکت ملی نفت ایران، مدیریت برنامه ریزی تلفیقی، صندوق پستی ۱۸۶۳

چکیده: اصلاح شبکه مبدل‌های حرارتی از بهترین گزینه‌ها در بهینه‌سازی مصرف انرژی واحدهای صنعتی است. بیشتر روش‌های اصلاحی، بر فناوری پینچ بنا نهاده شده‌اند که در آن با استفاده از قانون‌های ترمودینامیکی و در نظر گرفتن محدودیت‌های ساختاری و اقتصادی، پروژه اصلاحی انجام می‌شود. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد نصب وسیله‌های افزایش دهنده انتقال حرارت درون لوله مبدل‌ها می‌تواند به منظور افزایش بازده انتقال حرارت به کار گرفته شود. انجام این روش افزون بر کاهش سطح شبکه به ازای بار حرارتی یکسان، موجب کاهش ضریب جرم‌گیری نیز می‌شود. در این میان انتخاب وسیله افزایش دهنده انتقال حرارتی که بتواند افزون بر افزایش بازده حرارتی سطوح مبدل‌ها، محدودیت‌های افت فشار را نیز رعایت کند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله ابتدا به برخی روش‌های غلبه بر محدودیت افت فشار در مبدل‌های حرارتی اشاره می‌شود. سپس روش انتخاب وسیله‌های افزایش دهنده انتقال حرارت در اصلاح شبکه مبدل‌های حرارتی بر اساس فناوری پینچ به گونه‌ای توسعه داده می‌شود که در آن محدودیت‌های افت فشار نیز مراعات شود. بعد از آن با توسعه الگوریتمی ضمن شناسایی وسیله‌های افزایش دهنده انتقال حرارت مناسب، میزان تأثیر آن بر کاهش سطوح مبدل‌های حرارتی تحقیق اصلاحی در نقطه هدف مشخص می‌شود. در پایان مقاله با آوردن مثالی کاربردی، نتیجه‌های این روش که خروجی‌های برنامه تدوین و توسعه یافته Pinch-HTE است مورد تحلیل قرار داده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: شبکه مبدل‌های حرارتی، اصلاح، سطح انتقال حرارت، بهبود انتقال حرارت، افت فشار

KEY WORDS: Heat Exchanger Network (HEN), Retrofitting, Area, Heat transfer enhancement, Pressure drop.

+ E-mail: m.jafarinasr@npc-rt.ir

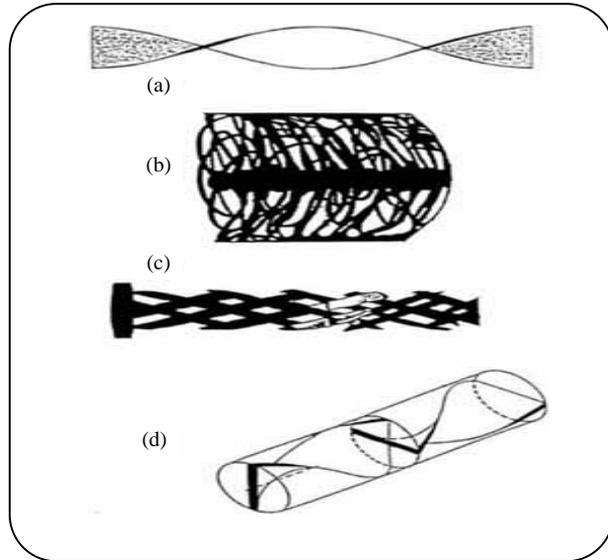
*عهده‌دار مکاتبات

مقدمه

با توجه به رشد صعودی تقاضای حامل‌های نفتی و درصد بالای مصرف بخش صنعت در سبد انرژی کشور [۱]، ضرورت پرداختن به بهینه‌سازی مصرف انرژی در این بخش احساس می‌شود. از این میان، اصلاح شبکه مبدل‌های حرارتی^(۱) صنایع شیمیایی در مقایسه با تصحیح راکتور و سیستم‌های جداکننده، به دلیل سهولت انجام و هزینه سرمایه‌گذاری کمتر، از جذابیت ویژه‌ای برخوردار است [۲].

در این مقاله الگوریتم ترکیبی اصلاح HEN بر مبنای فناوری پینچ^(۲) و فناوری بهبود انتقال حرارت^(۳) توسعه داده می‌شود که در نهایت موجب افزایش قابلیت اجرای اقتصادی پروژه اصلاحی می‌شود. در این روش از مفهوم افزایش ضریب انتقال حرارت در طرف کنترل کننده انتقال حرارت در یک مبدل حرارتی استفاده می‌شود. به طور معمول در مبدل‌های حرارتی لوله پوسته، طرف لوله به عنوان کنترل کننده سطح عمل می‌کند که برای افزایش ضریب انتقال حرارت در آن می‌توان از وسیله‌های خارجی که درون لوله مبدل قرار داده می‌شوند استفاده کرد. به کارگیری این وسیله‌ها موجب ایجاد جریان اغتشاشی و در نتیجه افزایش انتقال حرارت می‌شود. شکل ۱ چهار نمونه از این نوع وسیله‌های افزایش دهنده انتقال حرارت سمت لوله را نشان می‌دهد. در زیر به تاریخچه روش بالا به طور مختصر اشاره می‌شود.

اصلاح شبکه مبدل‌های حرارتی ابتدا با فرض ضریب انتقال حرارت ثابت انجام می‌گرفت [۳]. در این روش ضریب انتقال حرارت مبدل‌های افزوده شده برابر ضریب انتقال حرارت مبدل‌های قدیمی در نظر گرفته شده و به مسأله افت فشار قابل دسترس جریان‌ها توجهی نمی‌شد. با توجه به اینکه ضریب‌های انتقال حرارت تابعی از افت فشارهای تعیین شده است، لذا هیچ ضمانتی برای تطابق h مفروض و مقدار طراحی مبدل وجود ندارد. تفاوت بین ضریب انتقال حرارت در طراحی مبدل و در نظر گرفتن مقادیرهای پیش فرض و تخمینی باعث بروز مشکلاتی نظیر عدم وجود افت فشار مورد نیاز بعد از افزودن مبدل‌های اضافی در شبکه می‌شود. در عمل می‌توان با بهره‌گیری از روش افت فشار ثابت، بدون هیچ‌گونه تغییری روی پمپ و کمپرسورهای شبکه موجود، مطالعات اصلاحی را انجام داد [۴ و ۵].



شکل ۱- انواع وسیله‌های افزایش دهنده انتقال حرارت قابل نصب در لوله‌های مبدل حرارتی (به ترتیب نوار تابیده، توری بافته شده فلزی و مخلوط کننده ثابت)

اصلاح شبکه مبدل‌های حرارتی بر اساس فناوری پینچ در دو مرحله هدف‌گذاری و طراحی اصلاحی انجام می‌گیرد. در مرحله طراحی اصلاحی از شش ابزار طراحی استفاده می‌شود که چهار مورد آن مربوط به بازیافت حرارتی شبکه بوده و در دو حالت h ثابت و Δp ثابت مشترک است [۳]. دو ابزار دیگر برای کنترل محدودیت افت فشار در مرحله طراحی اصلاحی به کار می‌رود [۴ و ۵].

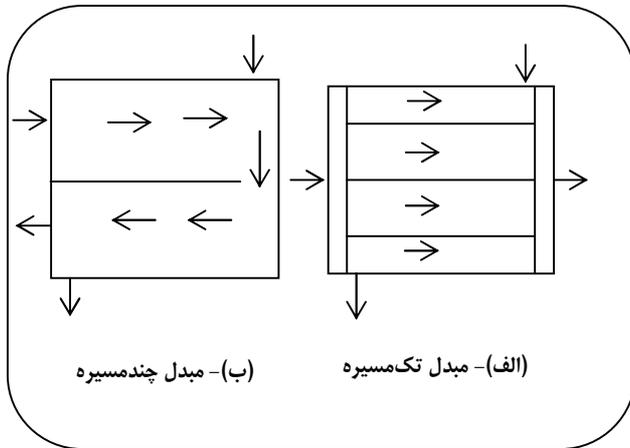
در مرحله طراحی اصلاحی با تحلیل کارایی مبدل‌های موجود از لحاظ بازیافت حرارتی و افت فشار، شناسایی مبدل‌های معیوب که در آنها ضعف انتقال حرارت وجود دارد صورت گرفته و تغییرهای ساختاری در شبکه به منظور افزایش بازیافت حرارتی و استفاده مؤثر از سطح و افت فشار در دسترس با استفاده از روش‌های ترمودینامیکی شناخته شده انجام می‌گیرد. یکی از انتخاب‌هایی که در مرحله طراحی اصلاحی به منظور بهبود بازده انتقال حرارت سطح مبدل‌ها می‌توان در نظر گرفت، استفاده از فن بهبود انتقال حرارت است.

Polley و همکاران نشان دادند که می‌توان با به کارگیری روش‌های افزایش انتقال حرارت ویژه در اصلاح HEN، نه تنها افزایش افت فشار در شبکه رخ ندهد [۶]، بلکه ضریب جرم‌گیری

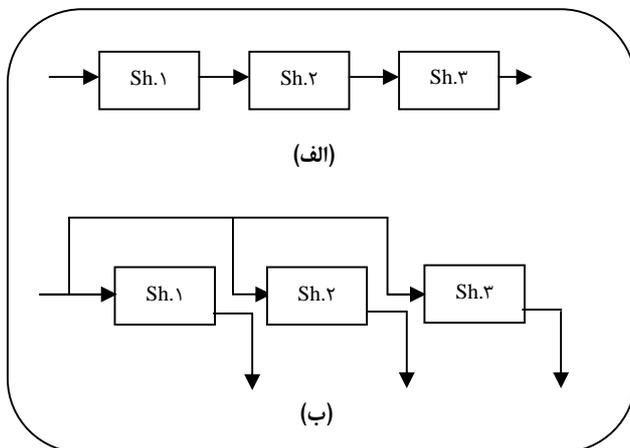
(۱) Heat Exchanger Network (HEN)

(۲) Pinch Technology

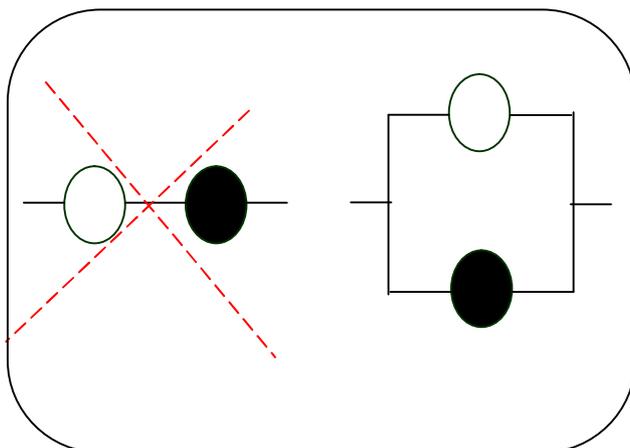
(۳) Heat Transfer Enhancement (HTE) Technology



شکل ۲- تبدیل مبدل چند مسیره به تک مسیره



شکل ۳- الف- پوسته‌های سری، ب- تقسیم جریان



شکل ۴- نصب موازی مبدل جدید در شبکه

مبدل‌های اصلاح شده نیز تا حد زیادی بهبود یابد. انتخاب وسیله‌های افزایش‌دهی انتقال حرارت بر اساس دو معیار اساسی انجام می‌شود:

- به اندازه کافی ضریب انتقال حرارت طرف لوله را افزایش دهد.
- افت فشار بیش از حد مجاز در جریان طرف لوله ایجاد نکند.

Zhu و همکاران با ابداع روشی فرایند استفاده از فن بهبود انتقال حرارت در اصلاح شبکه مبدل‌های حرارتی را توسعه دادند [۲]. در این روش ضمن شناسایی پتانسیل استفاده از فن بهبود انتقال حرارت، وسیله‌ی وارد شونده افزایش‌دهنده انتقال حرارت ویژه که بتواند افزایش ضریب انتقال حرارت هدف‌گذاری شده با توجه به محدودیت‌های افت فشار را برآورده کند شناسایی می‌شود.

Polley و جعفری‌نصر نشان دادند که در طراحی تفصیلی^(۱) مبدل‌های حرارتی لوله پوسته، با ایجاد تغییرهای ساختاری نظیر تبدیل مبدل چند مسیره^(۲) به تک مسیره^(۳) و استفاده از وسیله‌های افزایش‌دهنده انتقال حرارت در طرف لوله، افزون بر کاهش سطح انتقال حرارت مبدل حرارتی به ازای بار حرارتی ثابت، افت فشار مورد نیاز مبدل نیز کاهش می‌یابد [۷].

غلبه بر محدودیت افت فشار در مبدل‌های حرارتی

طبق قانون‌های تکنولوژی پینچ هر مبدل حرارتی در شبکه دارای یک افت فشار در دسترس ویژه است که باید به منظور رسیدن به حداقل سطح شبکه از آن پیروی کند [۴ و ۵]. از طرفی با افزودن وسایل افزایش‌دهنده انتقال حرارت در طرف لوله مبدل حرارتی به منظور افزایش بازایافت حرارتی، افت فشار طرف لوله مبدل افزایش می‌یابد و حتی در مواردی ممکن است از افت فشار در دسترس نیز زیادتر شود. به منظور غلبه بر محدودیت بالا روش‌های گوناگونی می‌توان به کار برد که از آن جمله می‌توان به تبدیل مبدل‌های حرارتی با طرف لوله چند مسیره به تک مسیره (شکل ۲)، تقسیم جریان بین پوسته‌های سری شده یک مبدل (شکل ۳) و یا نصب مبدل جدید به صورت موازی با مبدل قدیمی (شکل ۴) اشاره کرد [۷ و ۸].

وقتی مبدل‌های اضافه شده به شبکه به صورت موازی با مبدل‌های قدیمی قرار گیرند، افزون بر کاهش افت فشار مبدل‌ها، ضریب انتقال حرارت نیز کاهش می‌یابد. برای رفع این مشکل و

(1) Detail design

(2) Multi pass

(3) Singl pass

داده شده در مراجع [۴ و ۵]، که برای مبدلی با لوله ساده و در شرایط افت فشار ثابت است، تعیین می‌شود. خروجی الگوریتم بالا سطح انتقال حرارت ایده‌آل و ضریب‌های انتقال حرارت هر یک از جریان‌هاست. سپس پتانسیل کاهش سطح با به‌کارگیری وسیله افزایشدهی انتقال حرارت با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\frac{A_{pt}}{A_{et}} = \frac{\left(1 + \frac{h_{pt}}{h_s}\right)^{1.5} \left(\frac{St^3}{f}\right)^{0.5}}{\left(1 + \frac{h_{et}}{h_s}\right)^{1.5} \left(\frac{St^3}{f}\right)^{0.5}} \quad (1)$$

که در آن $\frac{St^3}{f}$ فاکتور وابسته به شکل هندسی مبدل‌ها است و در دو حالت لوله ساده و لوله با افزایشدهی انتقال حرارت محاسبه می‌شود. A_{pt} و A_{et} سطح انتقال حرارت در حالت لوله ساده و افزایشدهی است. h_{pt} و h_s که عبارت از ضریب‌های انتقال حرارت برای طرف لوله و پوسته مبدلی بالوله ساده است، از الگوریتم پیش‌بینی سطح به‌دست می‌آید. h_{et} ضریب انتقال حرارت طرف لوله در مبدل با وسایل افزایشدهی انتقال حرارت است که با توجه به فاکتور z بسته به نوع وسیله‌ی افزایشدهی انتقال حرارت این ضریب محاسبه می‌شود. برای اینکه محاسبه کاهش سطح ارایه شده به‌سیله معادله بالا به راحتی صورت گیرد، همه پارامترهای مجهول بر حسب Re بیان می‌شوند. محاسبه‌های زیر به این منظور انجام می‌شود [۶]:

$$j = x Re^{-y} = \frac{NU}{Re \cdot Pr^{1/3}} \quad h = \left(\frac{xk \cdot Pr^{1/3}}{d_i}\right) Re^{(1-y)} \quad (2)$$

$$f = a \cdot Re^{-b}$$

$$St = \frac{A_f}{mC_p} h = \frac{A_f}{mC_p} \left(\frac{x \cdot k \cdot Pr^{1/3}}{d_i}\right) Re^{(1-y)}$$

ضریب‌های ثابت a, b, x, y برحسب شرایط جریان در حالت‌های لوله ساده و وسایل متفاوت افزایشدهی انتقال حرارت داده شده است [۶]. با توجه به رابطه‌های بالا می‌توان ضریب‌های St ، h را برای حالت‌های متفاوت به‌دست آورد و با جاگذاری در معادله‌ی (۱)، میزان کاهش سطح در اثر استفاده از وسیله‌های افزایشدهی انتقال حرارت را به‌دست آورد. شکل ۸ الگوریتم هدف‌گذاری سطح جدید با ملاحظات افت فشار مجاز جریان‌ها را نشان می‌دهد [۱۰]. تفاوت الگوریتم بالا با شکل ۶

استفاده حداکثر از شبکه اصلاح شده در مرحله طراحی اصلاحی، پس از نصب مبدل‌های جدید به‌صورت موازی می‌توان به شناسایی مبدل‌های موازی مناسب برای استفاده از وسایل افزایشدهی انتقال حرارت و تشخیص وسیله افزایشدهی انتقال حرارت مناسب پرداخت [۲].

الگوریتم هدف‌گذاری در اصلاح شبکه مبدل‌های حرارتی با کاربرد HTE

در این قسمت هدف اصلی یافتن الگوریتمی است که در پروژه‌های اصلاحی با توجه به محدودیت‌های طرح، که شامل هزینه سرمایه‌گذاری، بازگشت سرمایه و محدودیت‌های عملکردی (مانند افت فشار، ایمنی، فضا و مکان شبکه مبدل‌های حرارتی و ...) است، سطح اضافی مورد نیاز و میزان صرفه‌جویی انرژی را محاسبه کند. افزون بر این شناسایی وسیله‌ی افزایشدهی انتقال حرارت مناسب صورت پذیرد. بدین منظور ابتدا الگوریتم هدف‌گذاری در اصلاح شبکه مبدل‌های حرارتی به روش تکنولوژی پینچ و استفاده از تکنیک HTE به دو روش توسعه داده می‌شود. سپس به منظور نشان دادن مزایای روش دوم مثالی آورده می‌شود.

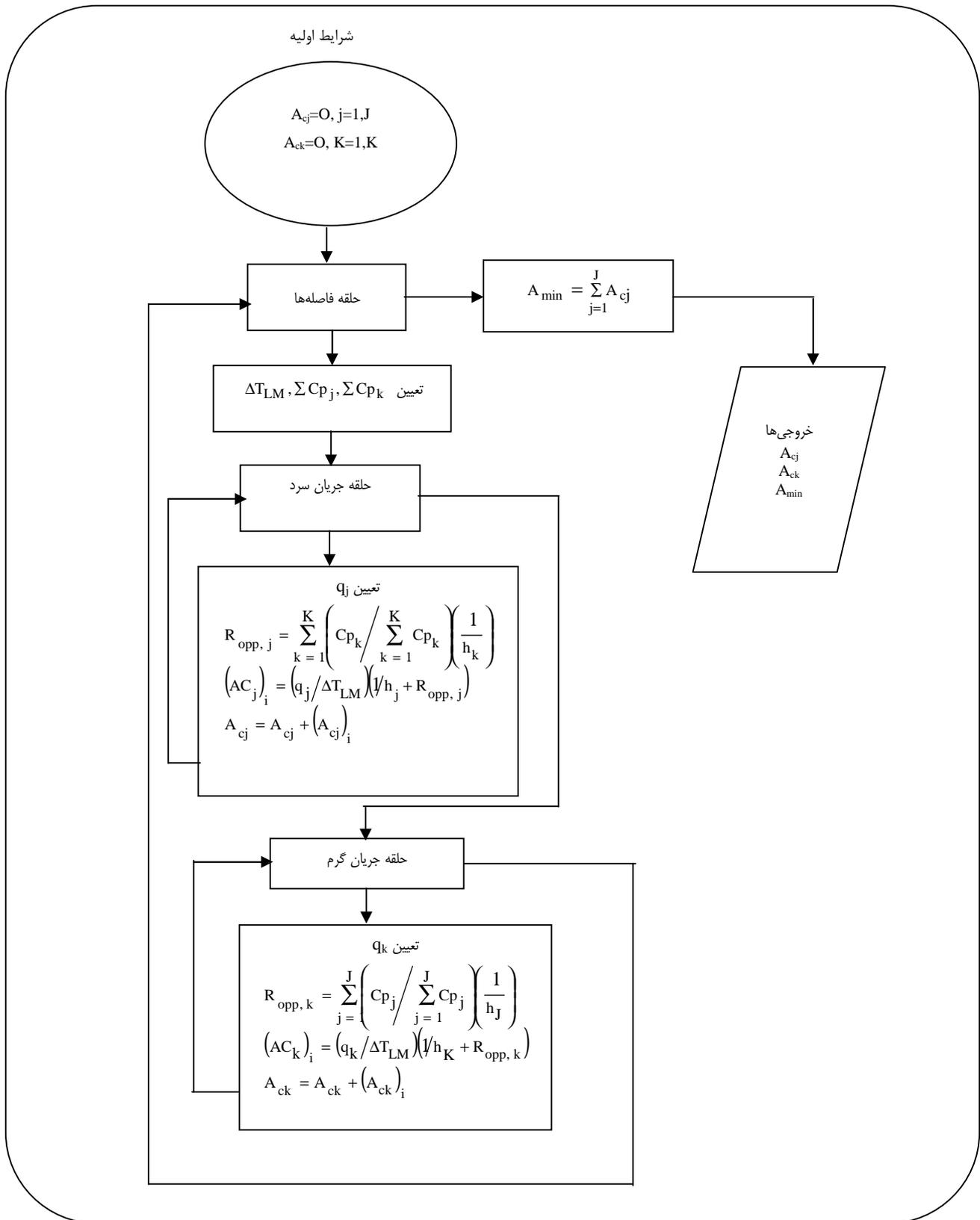
رسم منحنی ایده‌آل سطح - انرژی شبکه مبدل‌های حرارتی با کاربرد HTE

ترسیم منحنی سطح - انرژی ایده‌آل شبکه مبدل‌های حرارتی با توجه به داده‌های جریان‌های فرایندی، محدودیت‌های افت فشار جریان‌ها و به روش تکنولوژی پینچ انجام می‌شود که در آن از الگوریتم پیش‌بینی سطوح تماس جریان‌ها (شکل ۵) و الگوریتم هدف‌گذاری سطح با ملاحظات افت فشار مجاز جریان‌ها (شکل ۶) استفاده می‌شود. به ازای استفاده از افزایشدهی انتقال حرارت در طرف لوله، منحنی سطح - انرژی ایده‌آل HEN پایین‌تر از حالت لوله ساده قرار می‌گیرد (شکل ۷) [۶].

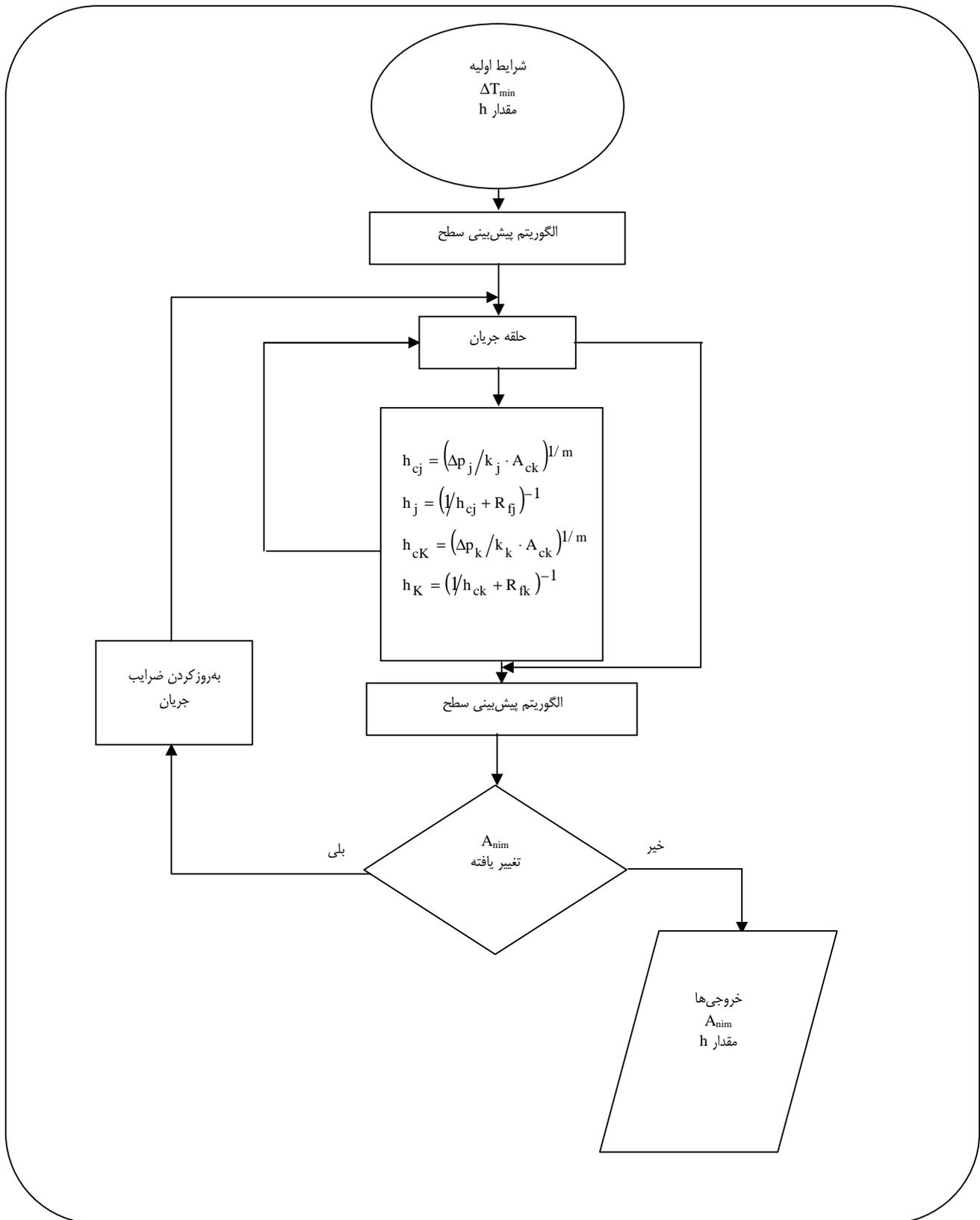
در این مقاله به منظور ترسیم منحنی A-E و مشخص کردن مسیر اصلاح با به‌کارگیری وسایل افزایشدهی انتقال حرارت دو روش توسعه داده می‌شود که در قسمت بعد خواهد آمد.

روش اول: انتخاب وسیله افزایشدهی انتقال حرارت مناسب پس از تعیین نقطه هدف

در این روش ابتدا مسیر اصلاحی با توجه به روش توسعه



شکل ۵ - الگوریتم پیش‌بینی سطح‌های تماس جریان‌ها ([۴] و [۵]).



شکل ۶ - الگوریتم سطح با ملاحظات افت فشار مجاز جریان‌ها [۴] و [۵].

جدول ۱- ضریب‌های اصطکاک و انتقال حرارت افزایش‌دهنده‌های انتقال حرارت طرف لوله متفاوت.

a	b	x	y	Tube Insert
۰٫۲۲۷	۰٫۳	۰٫۰۹۶	۰٫۳	C.w.(H/D=۵٫۵)
۰٫۲۵۱	۰٫۲۳	۰٫۱۲۲	۰٫۳	C.w.(H/D=۲٫۸)
۰٫۲۶۱	۰٫۱۶	۰٫۱۶۸	۰٫۳	C.w.(H/D=۱٫۱۲)
۰٫۲۱۹	۰٫۳۲	۰٫۱۰۸	۰٫۳۲۰۳	T.t.(S&L-H/D=۸٫۵)
۰٫۵۸۲	۰٫۳۸	۰٫۳۴۲	۰٫۴۲۰۶	T.t.(S&L-H/D=۳٫۶)
۰٫۰۶۷	۰٫۲۲	۰٫۰۲۷	۰٫۲۲۷	WC-۱۵
۰٫۱۰۰	۰٫۲۳	۰٫۰۴۱	۰٫۲۲۶۱	WC-۴۵
۰٫۱۵	۰٫۲۲	۰٫۰۶۱	۰٫۲۲۴۹	WC-۷۵
۰٫۲	۰٫۰۴۶	۰٫۲	۰٫۰۲۳	Plain

داده های جدول ۱ برای استفاده در معادله‌های (۱) و (۲) داده شده است.

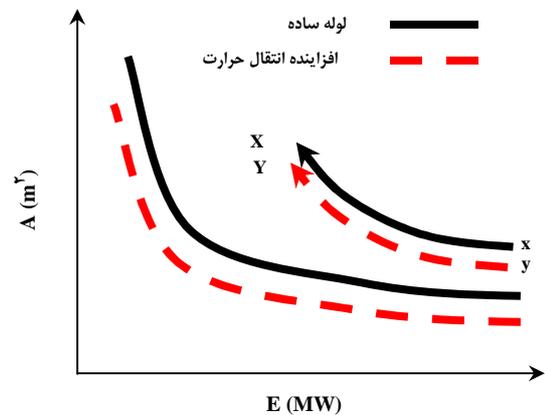
بنیان گذاشته شده است و در آن ارتباط بین ضریب‌های انتقال حرارت طرف لوله و پوسته به‌طور مستقیم طبق الگوریتم شکل ۶ رعایت می‌شود.

در مرحله اول هدف‌گذاری اصلاحی با فرض افت فشار ثابت برای دو حالت لوله ساده و افزایش‌دهنده انتقال حرارت انجام شده و منحنی A-E رسم می‌شود (شکل ۷). برای حالت استفاده از افزایش‌دهنده انتقال حرارت باید از ضریب‌های اصطکاک و انتقال حرارت لوله افزایش‌دهنده در الگوریتم سطح استفاده کرد (جدول ۱) [۲ و ۱۱].

مرحله بعد شامل شناسایی وسایل افزایش‌دهنده انتقال حرارتی است که باعث کاهش سطح نسبت به لوله ساده می‌شوند (شکل ۱۱). سپس با به‌کارگیری الگوریتم تشخیص وسیله‌ی افزایش‌دهنده مناسب (شکل ۱۰)، وسیله افزایش‌دهنده انتقال حرارتی که بیشترین کاهش سطح به ازای افت فشار ثابت را ایجاد کند، انتخاب می‌شود.

بررسی یک مثال نمونه

در دو قسمت گذشته به دو طریق الگوریتم پتانسیل کاهش سطح با استفاده از تکنولوژی HTE توسعه داده شد. در روش اول، ابتدا مسأله اصلاح برای مبدل‌هایی با لوله‌های ساده حل می‌شود. سپس با فرض ضریب انتقال حرارت ثابت در طرف پوسته، پتانسیل کاهش سطح، ناشی از به‌کارگیری وسیله‌های افزایش‌دهنده انتقال حرارت طرف لوله با استفاده از معادله (۱)، تعیین می‌شود.

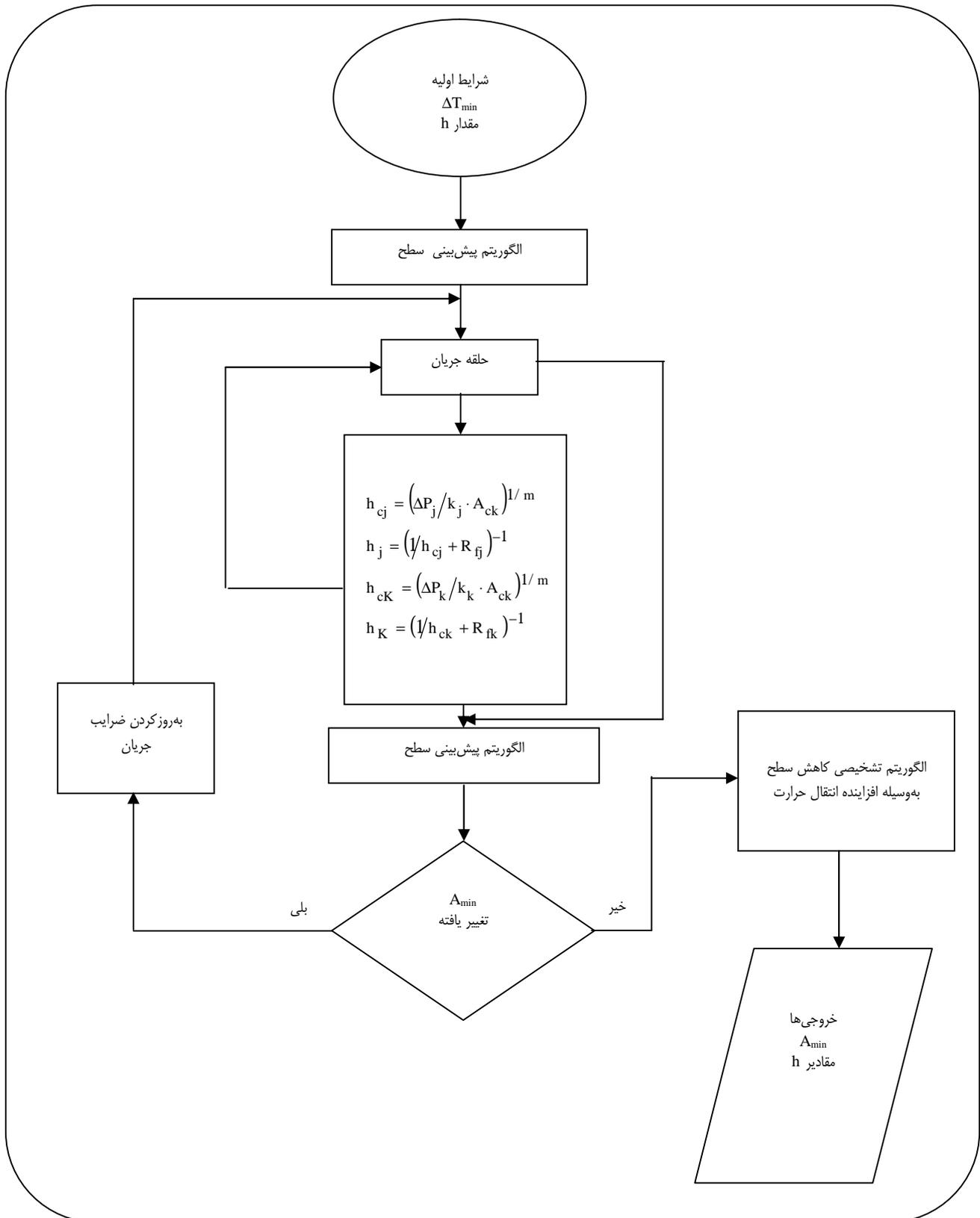


شکل ۷- منحنی سطح - انرژی ایده‌آل HEN با فرض افت فشار ثابت و افزایش‌دهنده انتقال حرارت

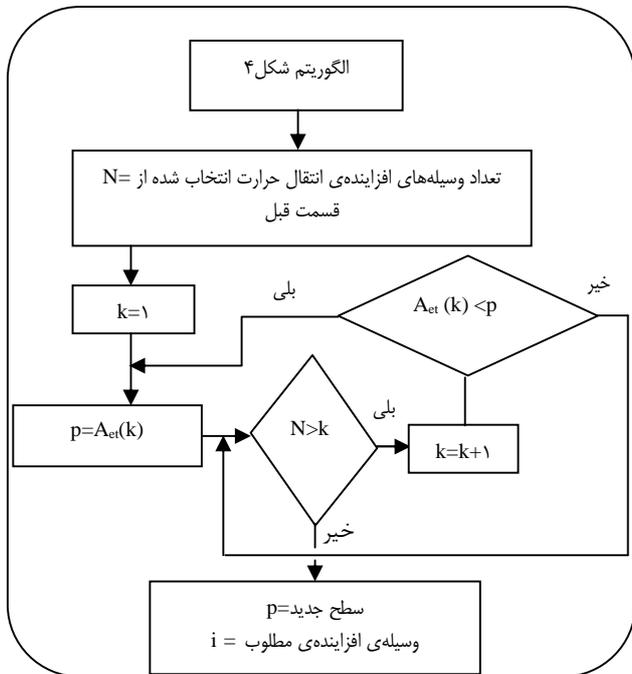
در این است که در اینجا برای نشان‌دادن اثر وسیله‌های افزایش‌دهنده انتقال حرارت طرف لوله در اصلاح HEN در مرحله پایانی از الگوریتم تشخیص کاهش سطح ناشی از به‌کارگیری این وسایل استفاده شده است. لازم به ذکر است که معادله‌های (۱) و (۲) بعداً توسط جعفری‌نصر اصلاح شده است که در آن میزان مقاومت‌های حرارتی نیز لحاظ شده است [۹]. در روش بالا ابتدا محاسبه‌ها برحسب افت فشار ثابت و لوله ساده انجام شده [۴ و ۵] و سپس در مرحله هدف‌گذاری با فرض ضریب انتقال حرارت ثابت طرف پوسته [۲]، پتانسیل کاهش سطح ناشی از به‌کارگیری وسیله‌های افزایش‌دهنده انتقال حرارت طرف لوله تعیین می‌شود. شکل‌های ۹ و ۱۰ الگوریتم‌های استفاده شده در این روش را نشان می‌دهد [۱۰]. در قسمت بعد نشان داده می‌شود که فرض ضریب انتقال حرارت ثابت طرف پوسته که در این بخش بیان شد به‌علت ارتباط حرارتی بین لوله و پوسته چندان دقیق نیست و لذا روش ارائه شده در قسمت بعد توصیه می‌شود.

روش دوم : انتخاب وسیله‌ی افزایش‌دهنده‌ی انتقال حرارت مناسب در مرحله هدف‌گذاری

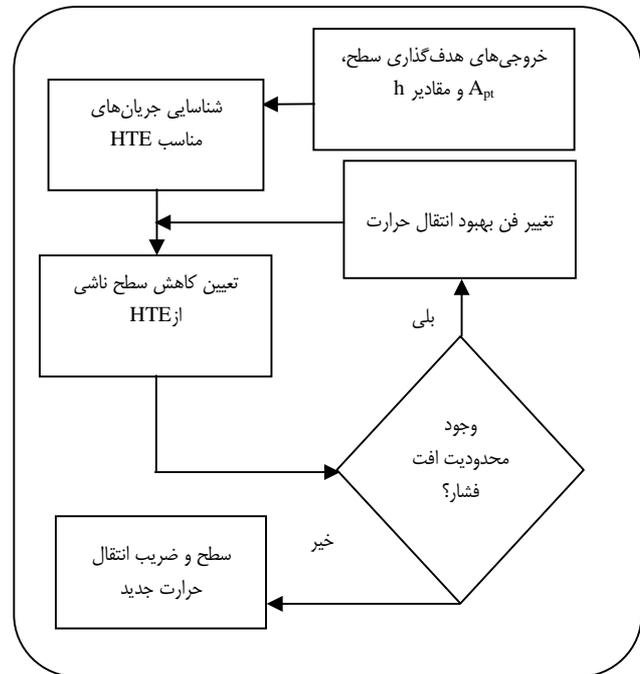
در قسمت قبل پس از هدف‌گذاری سطح برای لوله ساده، انتخاب وسیله‌ی افزایش‌دهنده‌ی انتقال حرارت مناسب انجام گرفت و میزان تأثیر آن در کاهش سطح شبکه مشخص شد. در این قسمت روش دو مرحله‌ای دیگری جهت کاربرد فن بهبود انتقال حرارت در اصلاح HEN توسعه داده می‌شود که بر پینچ فرایند



شکل ۸ - الگوریتم هدف‌گذاری سطح جدید با ملاحظات افت فشار مجاز جریان‌ها [۴].



شکل ۱۰- الگوریتم تشخیص وسیله‌ی افزایشدهی مناسب (روش اول).



شکل ۹- الگوریتم پتانسیل‌کاهش سطح با استفاده از تکنولوژی HTE (روش اول).

در حالت استفاده از وسیله‌ی افزایشدهی انتقال حرارت ذکرشده، در شرایط افت فشار ثابت، کمتر از حالت لوله ساده است. دلیل این امر را می‌توان در سطح اضافی نصب شده به صورت موازی با هدف غلبه بر محدودیت افت فشار ناشی از نصب وسیله‌ی افزایشدهی انتقال حرارت شماره ۶ جستجو کرد. به عبارت دیگر سطح مبدل با افزودن وسیله‌ی شماره ۶ کاهش می‌یابد، ولی افت فشار بیشتر از حد مجاز خواهد شد که برای جبران آن نیاز به نصب سطح انتقال حرارت جدید است. لذا در مجموع سطح انتقال حرارت با افزودن وسیله‌ی افزایشدهی انتقال حرارت ۶ بیشتر از حالت لوله ساده می‌شود. بنابراین، استفاده از وسیله‌ی افزایشدهی انتقال حرارت بالا در حالت افت فشار ثابت توصیه نمی‌شود. البته می‌توان از آن در موردهایی که محدودیت افت فشار وجود ندارد استفاده کرد. توضیحات بیشتر در این زمینه در مرجع [۱۰] آمده است.

مثال بالا در واقع شبکه مبدل‌های حرارتی پیش گرم‌کن پالایشگاه نفت خام را نشان می‌دهد که وظیفه تبادل حرارت بین جریان سرد ورودی نفت خام و شش جریان گرم خروجی از برج تقطیر را برعهده دارد. مشخصات جریان‌های سرد و گرم در جدول‌های ۳ و ۴ آمده است و نمودار شبکه مبدل‌های حرارتی و جریان فرایندی در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است [۲ و ۱].

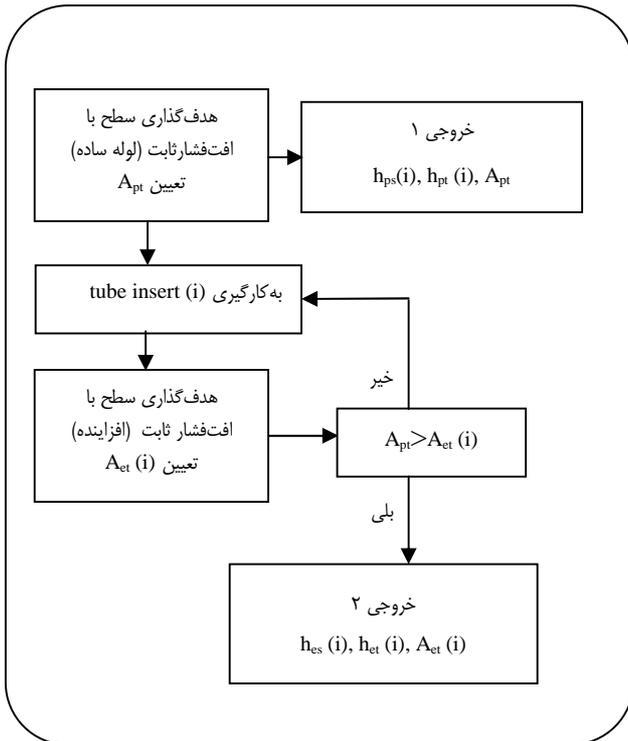
در روش دوم، مسأله اصلاحی با به‌کارگیری روش ارایه شده در مرجع‌های [۴ و ۵] و در نظر گرفتن ضریب‌های جدول ۱، برای دو حالت لوله ساده و لوله با وسیله‌ی افزایشدهی انتقال حرارت مناسب می‌شود و سپس انتخاب وسیله‌ی افزایشدهی انتقال حرارت مناسب صورت می‌گیرد. در این روش ضریب انتقال حرارت طرف پوسته در حالت به‌کارگیری وسیله‌ی افزایشدهی انتقال حرارت طرف لوله ثابت نیست و لذا در مقایسه با روش اول از دقت بیشتری برخوردار است [۱۰].

در جدول ۲ داده‌های خروجی نرم‌افزار تدوین شده Pinch-HTE برای مثال، مرجع [۲]، به منظور نشان دادن روش هدف‌گذاری روش دوم توسعه داده شده، ملاحظه می‌شود.

از جدول ۲ ملاحظه می‌شود وسیله‌ی افزایشدهی شماره ۳ (C.w.(H/D) ۲/۸) بیشترین کاهش سطح را در مقایسه با لوله ساده داشته است و بنابراین، زمان بازگشت سرمایه آن کمترین مقدار خواهد بود. لذا در مرحله طراحی اصلاحی به‌طور یقین وسیله‌ی افزایشدهی شماره ۳ مورد استفاده قرار خواهد گرفت. همچنین وسیله‌ی افزایشدهی شماره ۶ سطح انتقال حرارت بیشتری در مقایسه با لوله ساده، به ازای صرفه‌جویی انرژی یکسان، داشته است. این به آن معناست که ضریب‌های انتقال حرارت طرف لوله

جدول ۴ - مشخصات جریان سرد شبکه.

Comp.	$T_i(^{\circ}\text{C})$	$T_o(^{\circ}\text{C})$	HCF (W/c)*	HTC** (W/m ² °C)	MPD*** (Pac.)
Crude	۲۰	۳۹۰	۵۲۰۰۰۰	۱۱۳۵/۲	۱۷۲۴۴۲



شکل ۱۱- الگوریتم پتانسیل کاهش سطح (روش دوم)

لوله ساده و لوله با tube insert، در جدول ۱ مشاهده می شود [۱۰].

$$f = aRe^{-b} \quad (3)$$

$$j = xRe^{-y} \quad (4)$$

حال با توجه به داده های بالا و استفاده از الگوریتم طراحی سریع [۱۳] مسیر اصلاحی در مرحله هدف گذاری برای مثال، بالا به دست می آید که نتیجه های آن در زیر خواهد آمد. شکل ۱۴ منحنی ترکیبی در دو حالت شبکه ی موجود و شبکه ی هدف گذاری شده را نشان می دهد [۱۰].

در این شکل خط شکسته منحنی ترکیبی جریان گرم، خط راست منحنی ترکیبی جریان سرد شبکه موجود و خط چین منحنی ترکیبی جریان سرد در مرحله هدف گذاری را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود منحنی ترکیبی جریان گرم از ۳۰ تا ۳۸۰ درجه سانتی گراد منحنی ترکیبی جریان سرد از ۲۰ تا

جدول ۲- مقایسه کاهش سطح انتقال حرارت هدف به ازای انواع وسیله های افزاینده [۱۰].

Type	Saving (MW)	Area (m ²)	Reduction (m ²)	Payback (year)
Plain	۲۸,۱۳	۱۴۸۹۱,۷		۱,۲۳
Enh. ۱	۲۸,۱۳	۱۴۶۹۰,۲۲	۲۰,۱۴۸	۱,۲
Enh. ۲	۲۸,۱۳	۱۴۳۶۳,۳۰	۵۲۸,۴۰	۱,۱۵
Enh. ۳	۲۸,۱۳	۱۳۹۴۴,۹۷	۹۴۶,۷۳	۱,۰۸
Enh. ۴	۲۸,۱۳	۱۴۷۴۴,۲۷	۱۰۳,۴۳	۱,۲۲
Enh. ۵	۲۸,۱۳	۱۴۷۹۴,۱۰	۹۷,۶	۱,۲۲
Enh. ۶	۲۸,۱۳	۱۵۴۱۹,۳۴	-۵۲۷,۶۴	۱,۳
Enh. ۷	۲۸,۱۳	۱۴۶۳۳,۷	۲۵۸,۰۱	۱,۱۹
Enh. ۸	۲۸,۱۳	۱۴۰۸۱,۰۹	۸۱۰,۶۲	۱,۱۰۷

جدول ۳- مشخصات جریان های گرم شبکه.

Comp.	$T_i(^{\circ}\text{C})$	$T_o(^{\circ}\text{C})$	HCF (W/c)*	HTC** (W/m ² °C)	MPD*** (Pac.)
kerosene	۱۸۰	۳۰	۵۹۸۰۰	۱۶۹۰/۲	۴۵۶۳۴
LGO	۲۷۰	۴۰	۱۱۴۴۰۰	۱۴۸۵/۶	۵۹۸۸۶
HGO	۳۵۰	۳۰	۳۳۸۰۰	۱۱۴۴/۶	۲۹۴۷۶
ATB	۳۸۰	۵۰	۱۴۵۶۰۰	۱۴۱۹/۷	۸۵۹۶۴
naphtha	۱۵۰	۱۰۰	۶۵۷۸۰۰	۲۴۳۲/۹	۶۵۳۶۳
BPA	۲۹۰	۱۹۰	۳۸۴۸۰۰	۱۳۴۸/۴	۷۴۷۶۳۷

در مثال بالا بار گرمایشی خارجی ۸۰ مگاوات و بار سرمایشی ۵۳/۶ مگاوات است.

داده های مربوط به مبدل ها و سایر ویژگی های فیزیکی جریان ها در مرجع [۲] داده شده است. داده های شبکه مبدل های حرارتی موجود به صورت زیر است:

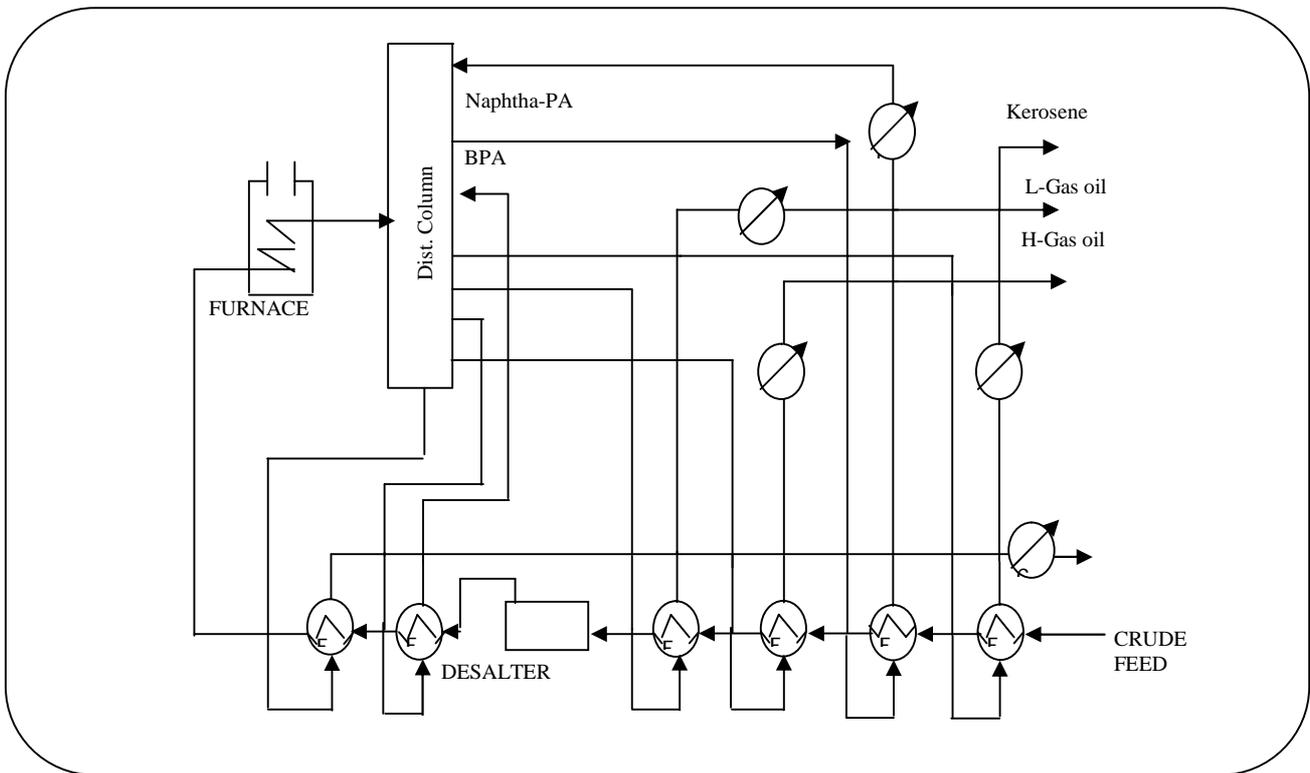
سطح انتقال حرارت کل ۶۹۶۰ متر مربع، بازده سطح انتقال حرارت شبکه ی موجود (XX به YY در شکل ۷) برای سه حالت یعنی [۱۰]:

$\alpha = 0/73$ ضریب انتقال حرارت ثابت:

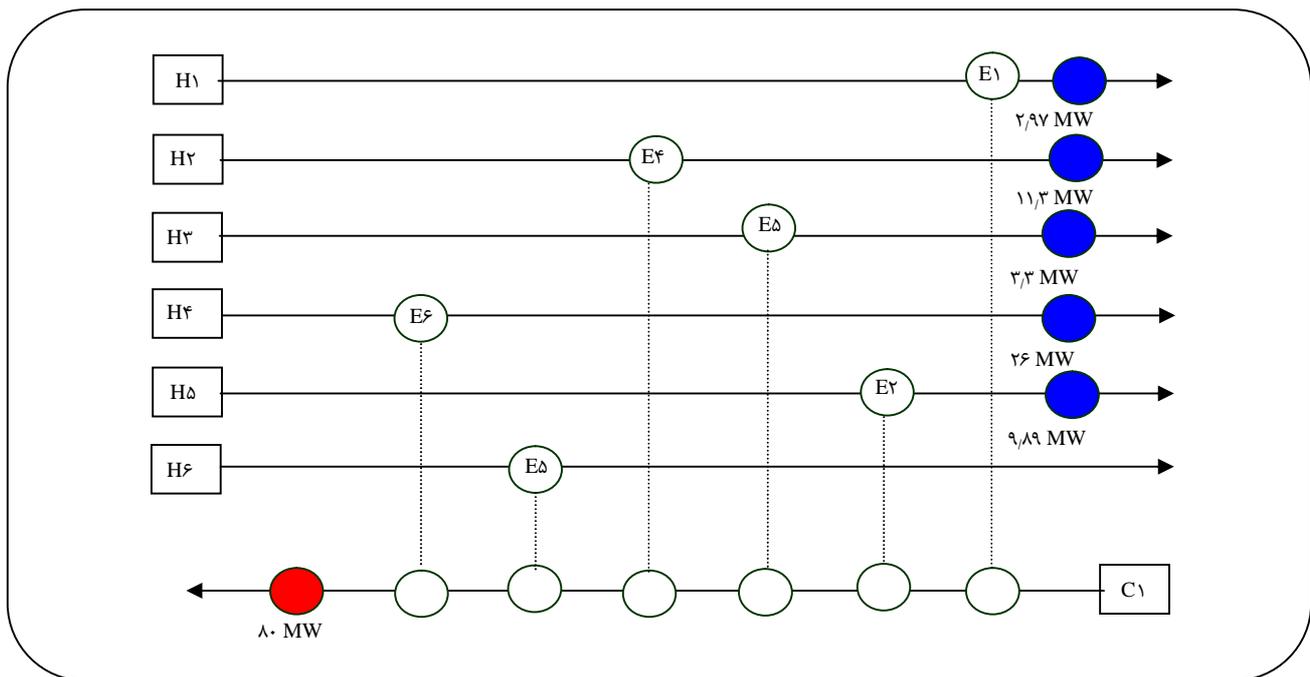
$\alpha = 0/6583$ افت فشار ثابت و لوله ساده:

$\alpha = 0/653$ افت فشار ثابت و tube insert:

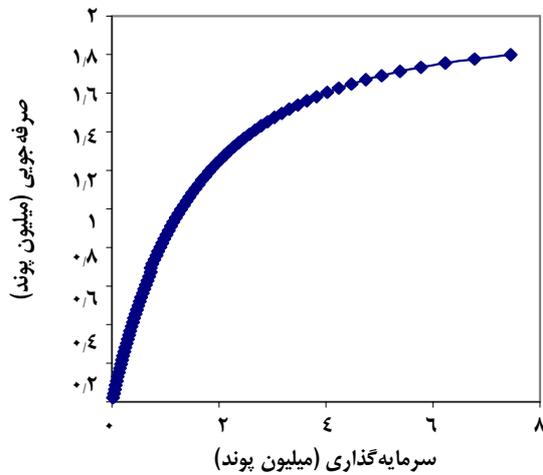
قیمت سوخت و هزینه های سرمایه ای از مرجع [۲] به دست می آید. همچنین مقادیر ضریب های ثابت فاکتور اصطکاک و فاکتور انتقال حرارت که با معادله های زیر محاسبه می شوند، برای



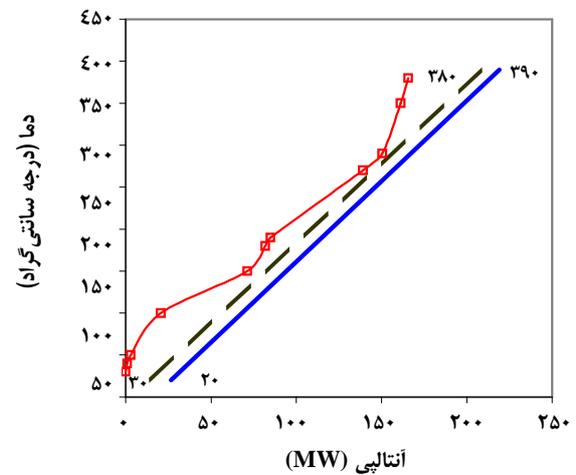
شکل ۱۲- مبدل‌های حرارتی شبکه در حال کار مثال ۱.



شکل ۱۳- جریان‌های فرآیندی مثال ۱.



شکل ۱۵- منحنی صرفه‌جویی - سرمایه‌گذاری.



شکل ۱۴- منحنی ترکیبی جریان‌های سرد و گرم در وضعیت موجود و هدف‌گذاری.

مفروض در دو حالت سرمایه‌گذاری کم و سرمایه‌گذاری بالاست. ستون آخر صرفه‌جویی انرژی ثابت در دو حالت به‌کارگیری وسیله‌های افزایش‌دهی انتقال حرارت سمت لوله و لوله ساده در طرح اصلاح شبکه مبدل‌های حرارتی به ازای دو مورد سرمایه‌گذاری کم و زیاد را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که به ازای صرفه‌جویی انرژی ثابت، مبدل‌های حرارتی با لوله ساده به سطح انتقال حرارت بیشتری نیاز دارد. همچنین با افزایش میزان سرمایه‌گذاری در طرح اصلاحی، مقدار هزینه صرف شده به ازای هر کیلووات صرفه‌جویی انرژی بیشتر می‌شود (۳/۴۸ دلار در مقایسه با ۰/۹۲ دلار برای سرمایه‌گذاری کم).

بحث و نتیجه‌گیری

با به‌کارگیری شیوه انتخاب وسیله‌ی افزایش‌دهی انتقال حرارت توسعه داده شده در این مقاله (روش دوم) به منظور اصلاح شبکه‌ی مبدل‌های حرارتی (HEN)، ملاحظه شد که افزون بر تعیین بیشترین افزایش بازده انتقال حرارت سطوح شبکه‌ی مبدل‌های حرارتی با استفاده از تکنولوژی HTE، از ایجاد محدودیت‌های افت فشار نیز جلوگیری می‌شود. افزون بر این با به‌کارگیری وسیله‌ی افزایش‌دهی انتقال حرارت انتخاب شده (در این مثال مورد شماره ۳)، زمان بازگشت سرمایه به ازای صرفه‌جویی انرژی یکسان به کمترین مقدار خود خواهد رسید که موجب افزایش قابلیت اجرای اقتصادی پروژه اصلاح HEN خواهد شد.

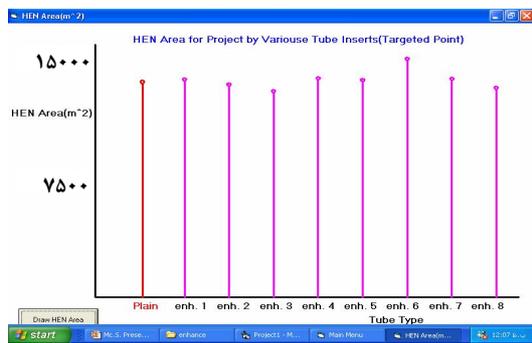
همان‌طور که ملاحظه شد تأثیر استفاده از وسیله‌های افزایش‌دهی انتقال حرارت طرف لوله در کاهش سطح اضافی مورد نیاز

۳۹۰ درجه سانتی‌گراد است. شکل ۱۱ به عنوان نمونه برای یکی از انواع وسیله‌های افزایش‌دهی انتقال حرارت رسم شده است. برای به‌دست آوردن منحنی ترکیبی جریان سرد در مرحله هدف‌گذاری از فاکتورهای اقتصادی نظیر حداکثر میزان سرمایه‌گذاری و بازگشت سرمایه استفاده می‌شود. در زیر برخی از نمودارهایی که به این منظور مورد استفاده قرار می‌گیرد آورده شده است. شکل ۱۵ نمودار صرفه‌جویی برحسب میزان سرمایه‌گذاری را نشان می‌دهد [۱۵].

ملاحظه می‌شود که هرچه سرمایه‌گذاری بیشتری انجام گیرد بر مقدار صرفه‌جویی افزوده می‌شود، ولی باید توجه داشت که در این‌گونه مطالعات همواره محدودیت میزان سرمایه‌گذاری وجود دارد.

شکل ۱۶ مقایسه بین سطح کل انتقال حرارت شبکه به ازای یک صرفه‌جویی خاص برای مبدل حرارتی با لوله ساده و هشت نوع tube insert را نشان می‌دهد [۱۰]. همان‌طور که از شکل ملاحظه می‌شود سطح کل انتقال حرارت شبکه نمودار اول (لوله ساده) از همه بیشتر و نمودار چهارم (Enh.۳) کمترین مقدار را دارا است. در این میان Eng.۶ یک استثنا محسوب می‌شود که به‌کارگیری آن موجب افزایش سطح انتقال حرارت در مقایسه با حالت لوله ساده شده است. دلیل ایجاد این حالت در قسمت ۴ (بررسی یک مثال نمونه) آمده است.

جدول ۵ نشان می‌دهد که میزان سرمایه‌گذاری تا چه اندازه می‌تواند بر مقدار صرفه‌جویی انرژی تأثیرگذار باشد [۱۰]. در این جدول ستون اول محدودیت سرمایه‌گذاری



شکل ۱۶- نتیجه‌های خروجی نرم افزار Pinch-THE

جدول ۵- اثر سرمایه گذاری بر میزان صرفه جویی انرژی.

Tube Type	Investment Million(\$)	Area (m ²)	Saving (MW)
Tube Insert1	۰٫۱۰	۳۵۴	۱٫۸۷
Plain Tube	۰٫۱۰	۳۸۱	۱٫۸۷
Tube Insert1	۸٫۰۰	۱۰٫۱۸۸	۲۳٫۰۰
Plain Tube	۸٫۰۰	۱۱٫۶۱۶	۲۳٫۰۰

پروژه اصلاحی و افزایش قابلیت اجرای آن قابل ملاحظه است. در مباحث ذکر شده تلفیقی از مرحله هدف گذاری پینچ و تکنیک بهبود انتقال حرارت باعث کاهش سطح اضافی مورد نیاز شد. با وجود اینکه به برخی از روش‌های غلبه بر محدودیت‌های افت فشار اشاره شد، ولی به طور کلی مرحله طراحی اصلاحی با کاربرد وسیله‌های افزایشنده انتقال حرارت، که در تکنولوژی پینچ مطرح می‌شود، در آن مورد بررسی قرار نگرفت که به فرصتی دیگر موقوف می‌شود.

فهرست علائم

a	ضریب ثابت اصطکاک در معادله ۳
A(m ²)	سطح انتقال حرارت مبدل حرارتی
A _{et} (m ²)	سطح انتقال حرارت شبکه با مبدل‌های لوله افزایشنده
A _f (m ²)	سطح مقطع جریان طرف لوله
A _{pt} (m ²)	سطح انتقال حرارت شبکه با مبدل‌های لوله ساده
b	ضریب ثابت اصطکاک در معادله ۳
c _p (J / kg °c)	ظرفیت گرمایی ویژه
d _i (m)	قطر داخلی لوله
f	فاکتور اصطکاک
h	ضریب انتقال حرارت
h _{es} (W/m ² c)	ضریب انتقال حرارت سمت پوسته (لوله با افزایشنده)
h _{et} (W/m ² c)	ضریب انتقال حرارت طرف لوله (افزاینده)
h _{ps} (W/m ² c)	ضریب انتقال حرارت طرف پوسته (لوله ساده)
h _{pt} (W/m ² c)	ضریب انتقال حرارت طرف لوله (ساده)
h _s (W/m ² c)	ضریب انتقال حرارت طرف پوسته
h _t (W/m ² c)	ضریب انتقال حرارت طرف لوله
j	فاکتور انتقال حرارت

k	ضریب رسانش
کوله	ثابت (W/m °c) فیزیکی طرف
k _s	ثابت فیزیکی طرف پوسته
m(kg /sec)	دبی جرمی جریان طرف لوله
Nu	عدد ناسلت
Pr	عدد پراتل
Re	عدد رینولدز
St	عدد استانتون
x	ضریب ثابت انتقال حرارت (معادله ۴)
y	ضریب ثابت انتقال حرارت (معادله ۴)

فهرست علائم یونانی

Δp	افت فشار، (Pas)
Δp _t	افت فشار طرف لوله، (Pas.)
Δp _s	افت فشار طرف پوسته، (Pas.)
Δt _{min}	حداقل اختلاف دمای انتقال حرارت (°c)
α	راندمان سطح انتقال حرارت

فهرست زیر نویس

et	طرف لوله با افزایشنده
pt	طرف لوله ساده
s	طرف پوسته
t	طرف لوله

فهرست علائم اختصاری

HEN	Heat Exchanger Network
HTE	Heat Transfer Enhancement

MPD	Maximum Pressure Drop (Pas.)	C.W	Cooling Water
		HCF	Heat Capacity Flowrate (W/°C)
		HTC	Heat Transfer Coefficient (W/m ² °C)
	تاریخ دریافت: ۸۲/۲/۱ ؛ تاریخ پذیرش: ۸۳/۲/۲۵		

مراجع

- [۱] ترازنامه انرژی، دفتر برنامه‌ریزی انرژی وزارت نیرو (۱۳۷۹).
- [2] Zhu, X.X., Zangir, M., Klemes, J., Heat Transfer Enhancement for Heat Exchanger Network Retrofit, *Heat Transfer Engineering*, **21**, 7 (2000).
- [3] Tjoe, T.N., Linnhof, B., "Using Pinch Technology for Process Retrofit", UMIST, McGRAW-HILL Publication, (1986).
- [۴] غفوریان صدیق، مهران؛ اصلاح شبکه‌ی مبدل‌های حرارتی به منظور رفع گلوگاه با در نظر گرفتن محدودیت‌های افت فشار، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، تهران، دانشگاه تهران، دانشکده فنی (۱۳۷۳).
- [۵] طاهونی، نسیم؛ رفع گلوگاه‌های ناشی از افزایش ظرفیت در شبکه‌ی مبدل‌های حرارتی همراه با بهینه‌سازی افت فشار جریان‌ها، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، تهران، دانشگاه تهران، دانشکده فنی (۱۳۷۹).
- [6] Polley, G.T., Reyes Athie, C.M. and Gough, Use of Heat Transfer Enhancement in Process Integration, *Heat Recovery System*, **12** (3) p.191, (1992).
- [7] Jafari Nasr, M.R., Polley, G.T., Should You Use Enhanced Tubes?, *Heat Transfer Journal, CEP*, p. 44, April (2002).
- [۸] جعفری نصر، محمد رضا؛ ذوقی، علی تقی؛ بهبود راندمان مبدل‌های پیش گرم کن پالایشگاه تهران به کمک فناوری بهبود انتقال حرارت، فصلنامه تحقیق، پژوهشگاه صنعت نفت، شماره ۴۰، تابستان (۱۳۸۰).
- [9] Jafari Nasr, M.R., Zoghi, A.T. and Khakdaman, H.R., Performance Evaluation of Heat Transfer Enhancement in Heat Exchanger Design, *Tahghigh Journal*, No.43, (2002).
- [۱۰] شاهرودی، مهدی؛ اصلاح شبکه‌ی مبدل‌های حرارتی با استفاده از تکنیک بهبود انتقال حرارت (برای افزایش کارایی انرژی)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی، تهران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مکانیک (۱۳۸۱).
- [11] Wange, L. and Sunden, B., Application of Heat Transfer Enhancement in the Retrofit Design of Shell – and – Tube Heat Exchangers, Division of Heat Transfer, Lund Institute of Technology, Sweden, (2001).
- [12] Uday V. Shenoy, "Heat Exchanger Network Synthesis: Process Optimization by Energy and Resource Analysis", Second Edition, Gulf Publishing Company, (1995).