

طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی با ضرایب انتقال حرارت متفاوت با توجه به افت فشار مجاز جریانها: روش جدید هدفگذاری

محمد حسن پنجه شاهی

دانشیار گروه مهندسی شیمی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

احمد خوش‌گرد

گروه مهندسی انرژی - دانشکده فنی و مهندسی - واحد علوم و تحقیقات - دانشگاه آزاد اسلامی
(تاریخ دریافت ۸۲/۱/۱۷، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۲/۵/۴، تاریخ تصویب ۸۲/۱۲/۴)

چکیده

در این مقاله روشی جدید برای هدفگذاری^۱ شبکه مبدل‌های حرارتی در طراحی از پایه^۲ مبتنی بر تکنولوژی پینچ^۳ ارائه گردیده است. در روش فوق ضمن در نظر گرفتن افت فشار مجاز جریانها، تفاوت ضرایب انتقال حرارت فیلمی جریانها نیز در مرحله هدفگذاری انرژی و سطح مورد نیاز شبکه لحاظ گردیده است. در این روش بر خلاف روشهای متداول پینچ^۴ که جابجایی دمایی^۵ جریانها به یک اندازه و معادل $DT_{min}/2$ میباشد، جابجایی دمایی هر جریان متناسب با ضریب انتقال حرارت آن جریان^۶ صورت می‌پذیرد. با انجام این امر امکان استفاده از انتقال حرارت غیر عمودی سودمند^۷ و کاهش سطح مورد نیاز شبکه در مرحله هدفگذاری در نظر گرفته میشود. همچنین با استفاده از روابط و معادلات موجود بین هندسه مبدل، ضرایب انتقال حرارت فیلمی و افت فشار جریانها در مبدل‌های حرارتی، امکان بهره‌گیری از افت فشار مجاز جریانها در محاسبه حداقل سطح مورد نیاز و هزینه شبکه مبدل‌های حرارتی در مرحله هدفگذاری فراهم آمده است. در نتیجه بکارگیری این روش تخمینی بهتر و دقیقتر از سطح و انرژی مورد نیاز قبل از طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی فراهم خواهد آمد. نتایج استفاده از روش جدید هدفگذاری برای یک مسئله نمونه ارائه و با نتایج حاصل از بکارگیری روش متداول h مفروض و روش متداول فشار ثابت، مقایسه شده است، که بیانگر کارایی و سودمندی روش جدید در هدفگذاری از پایه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تکنولوژی پینچ، هدفگذاری، طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی، افت فشار، ضریب انتقال حرارت

مقدمه

کاربرد بیشتری یافته است. سنتز شبکه مبدل‌های حرارتی توسط تکنولوژی پینچ مشتمل بر دو مرحله هدفگذاری و طراحی میباشد [۳، ۵]. در مرحله هدفگذاری، حداقل انرژی و سطح مورد نیاز شبکه قبل از طراحی تعیین می‌گردد و هرچه روش بکار گرفته شده در این مرحله دقیقتر باشد امکان ارزیابی و انجام محاسبات دقیقتر اقتصادی طرح، قبل از طراحی و رسیدن به طراحی بهینه با حداقل هزینه میسر خواهد گردید. بسیاری از روشهای متداول در زمینه هدفگذاری شبکه مبدل‌های حرارتی بر مبنای ضرایب انتقال

سنتز شبکه مبدل‌های حرارتی در سالهای اخیر و بویژه پس از بروز بحرانهای انرژی در دهه هفتاد میلادی پیشرفت سریع و چشمگیری داشته است. روشهای علمی طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی عمدتاً مبتنی بر برنامه ریزی ریاضی^۸، تکنولوژی پینچ و یا تلفیقی از دو روش فوق میباشد که هر کدام از این روشها دارای نقاط قوت و ضعفی میباشد. از آنجا که تکنولوژی پینچ بر مبنای اصول دقیق ترمودینامیکی استوار بوده و بکار بستن آن نسبت به روشهای برنامه ریزی ریاضی ساده تر می‌باشد، استفاده از آن در طراحی شبکه مبدل‌های حرارتی

در این مقاله روشی جدید برای تعیین حداقل انرژی و سطح مورد نیاز شبکه با بکارگیری نقاط قوت هر کدام از روشهای فوق و امکان استفاده از افت فشار مجاز جریانها و در نظر گرفتن تاثیر تفاوت ضرایب انتقال حرارت آنها ارائه شده است.

هدفگذاری توسط روش متداول پینچ

حداکثر بازیافت حرارت در یک شبکه از مبدلهای حرارتی منجر به استفاده حداقل از سرویسهای جانبی سرد و گرم میگردد. در این روش حداقل سرویسهای جانبی سرد و گرم مورد نیاز شبکه، با در نظر گرفتن محدودیتهای ترمودینامیکی موجود در مسئله معین میشود. برای این منظور در ابتدا DT_{min} شبکه انتخاب میشود. سپس دماهای جدید^{۱۱} جریانهای سرد و گرم با افزایش یا کاهش $DT_{min}/2$ تعیین شده و با رسم آبشار حرارتی^{۱۲} حداقل انرژی سرمایشی و گرمایشی سیستم معین میشود [۳].

حداقل سطح مورد نیاز شبکه نیز پس از تعیین انرژی مورد نیاز شبکه و با رسم منحنی های مرکب جریانهای سرد و گرم^{۱۳} در همان DT_{min} مشخص میگردد. برای این منظور پس از رسم منحنی های مرکب و تعیین بازه های انتالی، با استفاده از مدل انتقال حرارت عمودی و فرمول بث در بازه های انتالی حداقل سطح مورد نیاز شبکه محاسبه میگردد [۳، ۵].

$$A_{min} = \sum_{i=1}^{interval} \frac{1}{\Delta T_{LMTD}} \sum_j \frac{q_{ji}}{h_j} \quad (1)$$

A_{min} = حداقل سطح مورد نیاز شبکه

DT_{LMTD} = متوسط لگاریتمی اختلاف دمای دو سر بازه انتالی

q_{ji} = بار حرارتی جریان j در بازه i

رابطه افت فشار، ضریب انتقال حرارت و سطح تبادل حرارت مبدل

شرایطی که بتوان افت فشار و ضرایب

حرارت مفروض^۹ می باشند. در این روشها، افت فشار مجاز جریانها در مرحله هدفگذاری در نظر گرفته نمی شود و این امر می تواند منجر به عدم تطابق نتایج سنتز شبکه و طراحی تفصیلی شبکه گردد. همچنین ممکن است باعث مقایسه نادرست بین هزینه های انرژی و سطح مورد نیاز مبدلها بمنظور تعیین DT_{min} بهینه شود [۱]. از طرف دیگر این روشها بر مبنای مدل انتقال حرارت عمودی و فرمول بث^{۱۰} استوار هستند و به همین دلیل در مواردیکه ضرایب انتقال حرارت جریانها تفاوت زیادی داشته باشند، بدلیل عدم امکان استفاده از انتقال حرارت غیر عمودی سودمند بین جریانها جهت کاهش سطح مورد نیاز شبکه، نمی توانند تخمین خوبی از حداقل سطح مورد نیاز شبکه ارائه نمایند.

در روشی که توسط دکتر پنجه شاهی [۱] بر مبنای افت فشار مجاز جریانها توسعه داده شده است با استفاده از مدل انتقال حرارت عمودی و رابطه بث، حداقل سطح مورد نیاز شبکه بر مبنای افت فشار جریانها محاسبه میگردد این امر باعث ایجاد همخوانی بین نتایج هدفگذاری و طراحی شبکه میگردد. از آنجا که این روش نیز بر مبنای انتقال حرارت عمودی بین جریانها در بازه های انتالی استوار است امکان استفاده از انتقال حرارت غیر عمودی سودمند در مرحله هدفگذاری لحاظ نگردیده است بنابراین نمی تواند تفاوت ضرایب انتقال حرارت جریانها را در مرحله هدفگذاری در نظر گیرد. برای در نظر گرفتن تاثیر تفاوت ضرایب انتقال حرارت در مرحله هدفگذاری روشی بنام Diverse Pinch توسط Rev & Fonyo [۲] ارائه شده است. در این روش جابجایی دمایی هر جریان متناسب با ضریب انتقال حرارت آن جریان صورت می پذیرد. این امر منجر به کاهش سطح مورد نیاز شبکه میگردد. لیکن بدلیل عدم در نظر گرفتن افت فشار مجاز جریانها در این روش، احتمال عدم تطابق نتایج سنتز شبکه و طراحی تفصیلی شبکه مبدلها وجود خواهد داشت. از طرفی در بسیاری از موارد عملی ضرایب انتقال حرارت جریانها نیز از قبل مشخص نیستند.

$$A_j = \sum_i^{\text{Intervals}} \left(\frac{q_{ji}}{\Delta T_{\text{LMTD},i}} \right) \left(\frac{1}{h_j} \right) \quad (7)$$

$$A_{C,j} = \sum_i^{\text{intervals}} \left(\frac{q_{ji}}{\Delta T_{\text{LMTD},i}} \right) \left(\frac{1}{h_j} + R_{\text{opp},j} \right) \quad (8)$$

$$R_{\text{Opp},j} = \sum_k^{\text{Streams}} \left(\frac{Cp_k}{\sum_k Cp_k} \right) \left(\frac{1}{h_k} \right) \quad (9)$$

در روابط فوق :

A_j : سطح مشارکتی جریان j

A_{Cj} : سطح تماس جریان j

$R_{\text{Opp},j}$: مقاومت جریانهای مقابل j در بازه i

Cp_k : ظرفیت گرمایی جریان k مقابل j در بازه i

h_k : ضریب انتقال حرارت فیلمی جریان k

با استفاده از روابط فوق حداقل سطح شبکه از رابطه

زیر محاسبه می گردد

$$A_{\min} = \frac{1}{2} \sum_j^{\text{Streams}} A_{Cj} \quad (10)$$

از طرفی ضرایب انتقال حرارت بکار رفته در معادلات فوق ضرایب انتقال حرارت کشیف^{۱۷} میباشد درحالیکه افت فشار جریان با ضرایب انتقال حرارت تمیز آنها مرتبط است از این رو با استفاده از رابطه زیر این دو ضریب به یکدیگر مرتبط می شوند

$$h_j = \frac{h_{Cj}}{1 + R_{f,j} h_{Cj}} \quad (11)$$

R_{fj} : مقاومت رسوب گذاری جریان j

h_j : ضریب انتقال حرارت کشیف^{۱۸}

h_{Cj} : ضریب انتقال حرارت تمیز^{۱۹}

هدفگذاری با ملاحظات تفاوت ضرایب

انتقال حرارت جریانها

در این روش طراحی شبکه که به Diverse

Pinch [۲] موسوم است ، تفاوت ضرایب انتقال

انتقال حرارت فیلمی جریانها در مبدل‌های حرارتی را به صورت تابعی از سرعت جریان نوشت ، میتوان رابطه ای بین سطح تبادل حرارتی مبدل، افت فشار و ضریب انتقال حرارت فیلمی بدست آورد . در صورتیکه جریان درهم و تک فازی باشد این رابطه بصورت زیر خواهد بود [۱] .

$$\Delta P = K A h^{\frac{(3-n)}{m}} \quad (2)$$

در رابطه فوق m توان عدد رینولدز در معادله ضریب انتقال حرارت فیلمی و n توان عدد رینولدز در رابطه ضریب اصطکاک و افت فشار میباشد. برای جریان سیال درون لوله این رابطه بفرم زیر خواهد بود [۴]:

$$\Delta P_{\text{Tube}} = K_{\text{Tube}} A h_{\text{Tube}}^{3.5} \quad (3)$$

و برای جریان سیال درون پوسته مبدل‌های حرارتی پوسته-لوله^{۱۴} این معادله بصورت زیر میباشد [۱] .

$$\Delta P_{\text{Shell}} = K_{\text{Shell}} A h_{\text{Shell}}^{5.1} \text{ Kern Method} \quad (4)$$

$$\Delta P_{\text{Shell}} = K_{\text{Shell}} A h_{\text{Shell}}^{4.412} \text{ Bell Method} \quad (5)$$

در روابط فوق K_{Tube} و K_{Shell} تابع خواص فیزیکی سیال سمت لوله یا پوسته مبدل و هندسه مبدل می باشند.

هدفگذاری سطح بر مبنای افت فشار

ثابت

در این روش نیز حداقل سطح مورد نیاز شبکه بر مبنای مدل انتقال حرارت عمودی و فرمول بٹ محاسبه می گردد با این تفاوت که بجای استفاده از سطح مشارکتی جریان^{۱۵} در این معادله ، رابطه بر اساس سطح تماس جریان^{۱۶} که با افت فشار جریان مرتبط است بازنویسی شده و استفاده می گردد.. برای این منظور فرمول بٹ بصورت زیر نوشته میشود [۱].

$$A_{\min} = \sum_j^{\text{Streams}} A_j \quad (6)$$

روش جدید هدفگذاری بر مبنای ضرایب انتقال حرارت متفاوت و افت فشار مجاز جریانها

در روش ارائه شده در این مقاله جابجایی دمایی هر جریان، متناسب با ضریب انتقال حرارت آن و بر اساس معادله زیر انجام می شود.

$$\Delta T_i = kh_i^{-z} \quad z \in [0.5, 1.0] \quad (15)$$

برای این منظور در ابتدا مقادیر اولیه k و Z و ضرایب انتقال حرارت جریانها انتخاب می شوند. سپس مقدار جابجایی هر جریان بر اساس این مقادیر و رابطه بالا محاسبه میشود و با انجام آبخار حرارتی، حداقل سرویسهای جانبی سرد و گرم مورد نیاز شبکه در k و Z انتخابی تعیین می شود. با تعیین منحنی های مرکب سرد و گرم شیفیت یافته، بازه های انتالپی و جریانهای موجود در هر بازه تعیین گردیده و باتوجه به رابطه دماهای واقعی هر جریان در دو سر هر بازه انتالپی مشخص میشود.

برای محاسبه سطح انتقال حرارت مورد نیاز شبکه، رابطه ۸ بصورت زیر بازنویسی می شود

$$Ac_{j,11}^i = \sum_k \frac{q_j}{\Delta T_{LM,jk}} \left(\frac{Cp_k}{\sum_k Cp_k} \right) \left(\frac{1}{h_j} + \frac{1}{h_k} \right) \quad (16)$$

$$Ac_{j,11} = \sum_i Ac_{j,11}^i \quad (17)$$

$$A_{min,11} = \frac{1}{2} \sum_j Ac_{j,11} \quad (18)$$

$Ac_{j,11}^i$: سطح تماس جریان j در بازه انتالپی i با جریانهای مقابل k در مبدل ۱ گذر لوله-گذر پوسته
 q_j : بار حرارتی جریان j در بازه i
 $\Delta T_{LM,jk}$: متوسط لگاریتمی اختلاف دماهای واقعی جریانهای j و k در بازه i
 برای محاسبه $\Delta T_{LM,jk}$ فرض میگردد که جریان j بصورت غیر همسو^{۲۰} با جریان k در بازه i در یک مبدل پوسته - لوله تبادل حرارتی انجام میدهد.

حرارت جریانها در همان ابتدا (مرحله هدفگذاری) لحاظ میگردد. این روش امکان استفاده از انتقال حرارت غیر عمودی سودمند بین جریانها جهت کاهش سطح شبکه را فراهم می آورد. برای این منظور جابجایی هر جریان، متناسب با ضریب انتقال حرارت آن انجام میشود بگونه ای که جریانهای با h کم بیشتر جابجا میشوند. جابجایی یا شیفت دمایی هر جریان بر اساس رابطه زیر انجام میگردد

پارامتر k نقشی مشابه DT_{min} در روشهای متداول پینچ دارد. در این روش پس از انتخاب پارامتر k و تعیین DT_i هر جریان، دماهای شیفیت یافته محاسبه شده و با رسم آبخار حرارتی، حداقل سرویسهای جانبی سرد و گرم مورد نیاز شبکه محاسبه میگردد. سپس بکمک دماهای جدید منحنی های مرکب شیفیت یافته جریانهای سرد و گرم رسم گردیده و با تعیین بازه های انتالپی، حداقل سطح مورد نیاز شبکه از رابط زیر که مشابه رابطه بٹ میباشد محاسبه می گردد [۲، ۶].

$$A_{min} = \sum_i \frac{1}{\Delta T_{LM,i}} \sum_j \frac{q_{j,i}}{h_j} \quad (13)$$

$$\Delta T_m = \Delta T_{sf} + \frac{1}{q_k} \sum_j |q_i \Delta T_{i,sf}| \quad (14)$$

$q_{j,i}$: بار حرارتی جریان j در بازه i
 DT_m : متوسط اختلاف دما در هر سر از بازه انتالپی
 $DT_{LM,i}$: متوسط لگاریتمی اختلاف دمای DT_m در دو سر بازه انتالپی
 h_j : ضریب انتقال حرارت فیلمی جریان j
 DT_{sf} : اختلاف دمای منحنی های شیفیت یافته سرد و گرم
 Q_k : طول بازه انتالپی
 $DT_{i,sf}$: مقدار جابجایی دمایی هر جریان بر اساس معادله ۱۲

در صورتیکه در مرحله هدفگذاری اثر افزایش گذر لوله در مبدلها نیز در نظر گرفته شود از روابط زیر بجای رابطه های قبلی استفاده می گردد.

$$Ac_{j,12}^i = \sum_k^{Streams} \frac{q_j}{\Delta T_{LM,jk} \times FT_{j,k}^i} \left(\frac{Cp_k}{\sum_k^{Streams} Cp_k} \right) \left(\frac{1}{h_j} + \frac{1}{h_k} \right) \quad (23)$$

$$Ac_{j,12} = \sum_i^{Intervals} Ac_{j,12}^i \quad (24)$$

$$A_{min,12} = \frac{1}{2} \sum_j^{Streams} Ac_{j,12} \quad (25)$$

$$h_{cj} = \left(\frac{\Delta P_j}{K_j Ac_{j,12}} \right)^{\frac{1}{m}} \quad \begin{matrix} m=3.5 & \text{TubeSide} \\ m=4.412 & \text{ShellSide} \end{matrix} \quad (26)$$

$$\text{Area Cost} = N \times a + b \times S_{min} \times \left(\left(\frac{A_{min,12}}{S_{min}} \right)^c \right) \quad (27)$$

$Ac_{j,12}^i$: سطح تماس جریان j در بازه آنتالپی i با جریانهای مقابل k در مبدل ۲ گذر لوله-۱ گذر پوسته $F_{T,jk}^i$: ضریب تصحیح $DT_{LM,jk}$ برای مبدل چند گذر لوله-۱ گذر پوسته در بازه i بین جریان j و k S_{min} : حداقل پوسته مورد نیاز شبکه

برای محاسبه حداقل پوسته (S_{min}) مورد نیاز شبکه، در ابتدا متوسط پوسته های مورد نیاز جفت جریانها در هر بازه آنتالپی محاسبه می شود. سپس حداقل پوسته مورد نیاز شبکه بر اساس مجموع مقادیر متوسط پوسته های مورد نیاز بازه های آنتالپی در بالا و پایین نقطه پینچ تخمین زده می شود [۷].

الگوریتم این روش هدفگذاری در شکل (۱) ارائه گردیده است.

معیار انتخاب و نقش پارامترهای k و z در

روش جدید

پارامترهای k و z تواما نقشی مشابه DT_{min} در روشهای متداول دارند. افزایش k در z ثابت، منجر به افزایش جابجایی دمایی متفاوت در جریانها و در

پس از محاسبه سطح تماس هر جریان در تمام بازه های آنتالپی تشکیل شده توسط منحنی های شیفته یافته، ضریب انتقال حرارت فیلمی تمیز جریانها از رابطه ۱۹ محاسبه می گردد. برای این منظور جریانهای گرم (فرآیندی و سرویس جانبی گرم) سمت پوسته مبدل و جریانهای سرد (فرآیندی و سرویس جانبی سرد) در سمت لوله مبدلهای حرارتی پوسته و لوله در نظر گرفته شده اند [۱].

$$h_{cj} = \left(\frac{\Delta P_j}{K_j Ac_{j,11}} \right)^{\frac{1}{m}} \quad \begin{matrix} m = 3.5 & \text{TubeSide} \\ m = 4.412 & \text{ShellSide} \end{matrix} \quad (19)$$

همچنین توسط معادله ۱۱ ضرایب انتقال حرارت کثیف جریانها محاسبه می گردد. سپس بکمک مقادیر جدید محاسبه شده h ، مجدداً مراحل فوق جهت تعیین حداقل انرژی و سطح مورد نیاز شبکه تکرار میشود. عمل تکرار تا زمانیکه مقادیر محاسباتی h جریانها با خطای قابل قبولی یکسان شوند ادامه میابد. تعداد حداقل مبدل مورد نیاز شبکه نیز بکمک روابط موجود و بر اساس تعداد جریانهای موجود در بالا و پایین نقطه پینچ تعیین می شود [۵]. پس از تعیین اهداف انرژی و سطح شبکه در یک k و z معین، مقادیر بهینه k و z محاسبه می گردند. تعیین k و z بهینه مستلزم ارزیابی اقتصادی میباشد. برای این منظور از روابط زیر استفاده شده است [۱،۳].

$$\text{Area Cost} = N \times \left(a + b \times \left(\frac{A_{min,11}}{N} \right)^c \right) \quad (20)$$

$$\text{Annualization Factor} = \frac{i \times (i+1)^t}{(i+1)^t - 1} \quad (21)$$

$$\text{Total Cost} = \text{Energy Cost} + \text{Area Cost} \times \text{Annualization Factor} \quad (22)$$

i : نرخ بهره

t : طول عمر واحد طراحی شده

a, b, c : ثابتهای معادله هزینه مبدل

باشد Nishimura [۹] نشان داده است که سهم هر جریان در DT_{min} بهینه برای رسیدن به حداقل سطح، توسط رابطه زیر و بر اساس ضریب انتقال حرارت آن جریان قابل محاسبه می باشد. این امر مطابق انتخاب $Z=0.5$ در روش جدید می باشد

$$\Delta T_i = \frac{k}{\sqrt{h_i}} \quad \text{or} \quad \Delta T_i = kh_i^{-0.5}$$

$$\text{or} \quad z = 0.5$$

(۲۹)

در رابطه ۲۹ مقدار k توسط میزان بازیافت حرارت مورد نظر در شبکه تعیین می گردد.

در نتیجه در روش ارائه شده در این مقاله، با تغییر k و Z در محدوده های ذکر شده، مقادیر بهینه آنها توسط بررسی اقتصادی هزینه شبکه انتخاب میگردد

مسئله نمونه

برای اطلاعات مندرج در جدول (۱) [۱،۶] اهداف انرژی و سطح توسط روش جدید ارائه شده درمقاله محاسبه و با نتایج روشهای دیگر مقایسه میگردد.

نتایج بکارگیری روش متداول پینچ با ضرایب انتقال حرارت مفروض در جدول (۲) ارائه گردیده است. هدفگذاری در $DT_{min}=30^{\circ}C$ انجام شده است. از آنجا که استفاده از روش افت فشار ثابت مستلزم موجود بودن خواص فیزیکی جریانهای سرد و گرم میباشد لذا خواص فیزیکی و افت فشار مجاز جریانهای مسئله فوق بر اساس جدول (۳) در نظر گرفته شده اند.

نتیجه افزایش نیروی محرکه انتقال حرارت در شبکه، افزایش مصرف انرژی و کاهش سطح مورد نیاز شبکه می گردد. بعبارتی $k=0$ معادل $DT_{min}=0$ در روشهای متداول می باشد، لذا k بایستی عددی مثبت انتخاب شود. افزایش k تا محدوده ای که منجر به ایجاد فضای خالی یا انقطاع بر روی هر یک از منحنی های مرکب شیفته سرد یا گرم نگردد امکانپذیر خواهد بود.

تغییر Z در k ثابت، موجب تغییر ساختار جریانها در دو محدوده بالا و پایین پینچ میگردد و این امر علاوه بر تاثیر بر روی اهداف سطح و انرژی، احتمال تغییر تعداد مبدلهای مورد نیاز شبکه را نیز بهمراه خواهد داشت. دلیل انتخاب Z در بازه $[0.5, 1]$ ایجاد تطابق با مطالعات انجام شده قبلی و روشهای پیشنهادی توسط افراد مختلف می باشد. یکی از دیدگاههای مهم و کاربردی در هدفگذاری و طراحی شبکه با ضرایب انتقال حرارت متفاوت، استفاده از شار حرارتی مینیمم (Q''_{min}) در مبدلهای حرارتی بجای DT_{min} کلی در شبکه می باشد. [۸] این دیدگاه تطابق مناسبی با نتایج صنعتی داشته و اساس کار Rev و Fonyo نیز می باشد [۲] در این روش سهم مشارکتی هر جریان در نیروی محرکه از رابطه زیر تعیین می گردد و مطابق $Z=1$ در روش جدید می باشد.

$$\Delta T_i = \frac{2(Q''_{min})}{h_i} \quad \text{or} \quad \Delta T_i = kh_i^{-1}$$

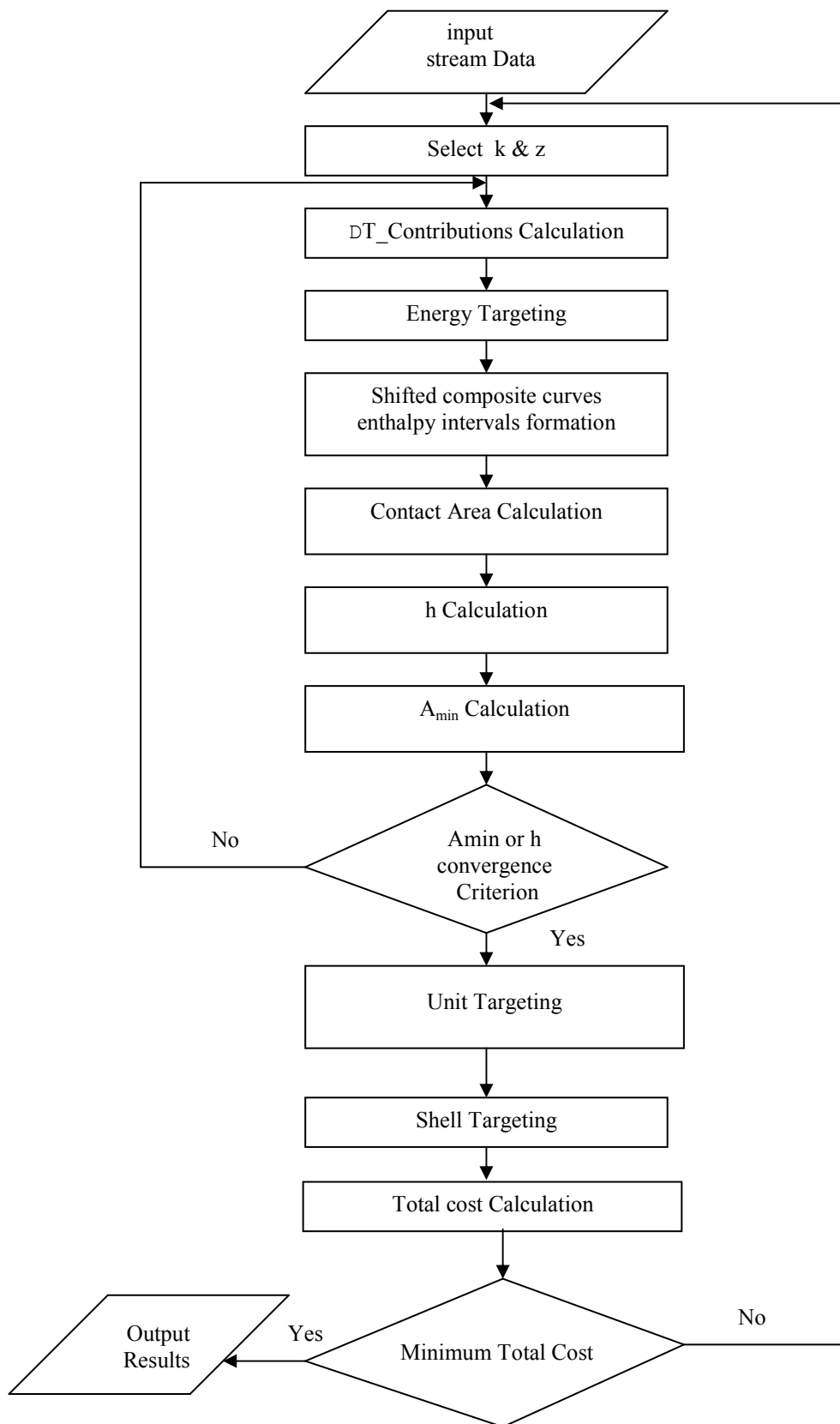
$$\text{or} \quad z = 1$$

(۲۸)

از دیگر سو، در مواردیکه بازیافت حرارت بین یک جریان گرم یا سرد با چند جریان مخالف مد نظر

جدول ۱: اطلاعات جریانهای مسئله نمونه

Streams	Tin (°C)	Tout (°C)	mCp (kW/°C)	h (kW/m ² °C)
H1	159	77	2.285	0.1
H2	267	80	0.204	0.04
H3	343	90	0.538	0.5
C1	26	300	0.933	0.01
C2	118	127	1.961	0.5
Hot Utility	300	265	---	0.5
Cold Utility	20	60	---	0.2
Cold Utility Cost =10\$/kW Hot Utility Cost =110\$/kW			Area Cost =3800+750A ^{0.83}	



شکل ۱: الگوریتم روش جدید هدفگذاری.

جدول ۲: نتایج هدفگذاری روشهای متداول با h مفروض.

Streams	Assumed h $DT_{min} = 30^{\circ}C$		
	$AC_{11,j} m^2$	$AC_{12,i} m^2$	$h (kW/m^2 \cdot ^{\circ}C)$
H1	178.76	204.49	2.285
H2	30.79	34.49	0.204
H3	39.98	45.78	0.538
Hot Utility	49.122	50.022	0.933
C1	194.43	227.21	1.961
C2	73.05	74.99	----
Cold Utility	31.181	32.23	----
$Amin_{11} = 298.658 m^2$		Hot Utility = 145.67 kW	
$Amin_{12} = 334.441 m^2$		Cold Utility = 123.80 kW	

جدول ۳: خواص فیزیکی و افت فشار مجاز جریانها.

Streams	Density (kg/m ³)	Cp (j/kg ^o C)	Viscosity Cp	k_f W/m ^o C	R_f m ² /w ^o C	DP kPa
H1	0.941	1000	0.06	0.001	0.00014	30
H2	892	3000	1.5	0.1	0.00011	50
H3	2	1307	0.061	0.018	0.00011	20
C1	1	2440	0.07	0.006	0.00015	45
C2	1141	4000	1.42	0.09	0.00012	70

جدول ۴: نتایج بدست آمده در روش هدفگذاری افت فشار ثابت - مبدل ۲-۱.

Streams	Fixed $D p$ $DT_{min} = 30^{\circ}C$		
	$AC_{13} m^2$	$h_{Fouled} (kW/m^2 \cdot ^{\circ}C)$	$h_{Clean} (kW/m^2 \cdot ^{\circ}C)$
H1	261.51	0.08113	0.08206
H2	40.4	0.0363	0.0365
H3	57.52	0.488	0.516
Hot Utility	50.52	0.05	---
C1	294.80	0.00765	0.00766
C2	78.52	0.0451	0.478
Cold Utility	36.63	0.2	---
$Amin_{12} = 409.95 m^2$		Hot Utility = 145.67 kW	
		Cold Utility = 123.80 kW	

جدول ۵: نتایج بدست آمده در روش هدفگذاری افت فشار ثابت - مبدل ۱-۱.

Streams	Fixed $D p$ $DT_{min} = 30^{\circ}C$		
	$AC_{11,j} m^2$	$h_{Fouled} (kW/m^2 \cdot ^{\circ}C)$	$h_{Clean} (kW/m^2 \cdot ^{\circ}C)$
H1	215.89	0.0847	0.0857
H2	34.72	0.0376	0.0377
H3	47.40	0.509	0.5393
Hot Utility	49.56	0.05	---
C1	237.59	0.0081	0.00815
C2	75.56	0.456	0.482
Cold Utility	34.42	0.2	---
$Amin_{11} = 347.57 m^2$		Hot Utility = 145.67 kW	
		Cold Utility = 123.80 kW	

جدول ۶: مقایسه نتایج بدست آمده در سطوح انرژی یکسان برای AC₁₁.

AC ₁₁ (m ²)					
FixedD P	Fixed h	new method			
		z=1	k=0.70898	z=0.5	k=4.10751
347.57	298.66	376		279.98	
Hot Utility=145.67 kW Cold Utility=123.80 kW					

جدول ۷: مقایسه نتایج بدست آمده در سطوح انرژی یکسان برای AC₁₂.

AC ₁₂ (m ²)					
FixedD P	Fixed h	new method			
		z=1	k=0.69812	z=0.5	k=4.07087
409.95	334.44	312.75		299.97	
Hot Utility=145.67 kW Cold Utility=123.80 kW					

جدول ۸: تعیین k بهینه در z=1.

k	Hot Utility (kWatt)	Cold Utility (kWatt)	AC ₁₁ (m ²)	Total Cost (\$/yr)
0.5	126.374	105.506	371.04	58248.69
0.6	135.962	115.094	322.50	55601.51
0.7	144.911	124.04	287.62	53887.21
0.8	153.549	132.681	260.99	52756.08
0.9	161.839	140.971	240.39	52098.08
1	170.284	149.416	232.70	52418.73
1.1	178.826	157.958	232.10	53393.58
1.2	185.087	164.219	198.44	51289.88
1.3	192.473	171.608	188.66	51331.16
1.4	199.730	178.862	179.96	51443.82
1.5	206.883	186.015	172.21	51622.17

برای Z و k های متفاوت در سطح انرژی یکسان با روش‌های قبلی در جداول (۶) و (۷) بصورت مقایسه ای ارائه گردیده است

با توجه به نتایج جدول (۶) و (۷) مشاهده میگردد با تغییر Z و k در سطح انرژی گرمایشی و سرمایشی ثابت سطح مورد نیاز شبکه تغییر مینماید لذا هر دو پارامتر فوق بایستی بهینه شوند در روش ارائه شده در این مقاله در ابتدا در یک Z ثابت k بهینه مشخص میگردد سپس با تغییر Z مجدداً این عمل تکرار میگردد و در نییجه مقادیر بهینه این دو پارامتر مشخص می گردد .

نتایج جستجو برای تعیین k بهینه در z=1 در جدول (۸) ارائه گردیده است.

نتایج استفاده از روش افت فشار ثابت جریانها در هدفگذاری در $DT_{min}=30^{\circ}C$ در جداول (۴) و (۵) ارائه شده است

همانگونه که از نتایج بدست آمده برای دو روش مشخص است (جدولهای ۲ تا ۵) مشاهده می گردد که در هر دو روش ، سطوح انرژی یکسان میباشد ولی در نظر گرفتن افت فشار مجاز جریانها در روش دوم منجر به تغییر (کاهش نسبی) ضرایب انتقال حرارت و در نتیجه افزایش سطح مورد نیاز گردیده است .بنابر این روش دوم امکان تخمین دقیقتر سطح و تعیین ضرایب انتقال حرارت جریانها را در مرحله هدفگذاری و بر اساس افت فشار مجاز جریانها فراهم مینماید.

نتایج بکارگیری روش جدید در این مسئله

نتایج بهینه سازی هر دو پارامتر k و Z در جداول (۹) و (۱۰) ارائه گردیده است. برای این امر در ابتدا در Z ثابت، بهینه محاسبه شده است سپس با تغییر Z و k تعیین گردیده است. مقدار بهینه Z در بازه $[0.5, 1]$ عمل فوق تکرار و مقدار بهینه Z و k تعیین گردیده است.

جدول ۹: نتایج جستجو برای k و Z بهینه مسئله نمونه.

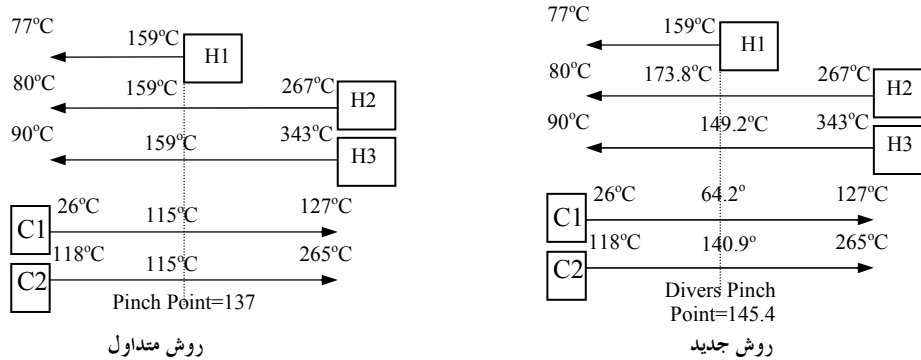
Optimization Parameters		Calculated parameters at Z and K_{Opt}				
Z	k_{Opt}	Hot Utility (kWatt/yr)	cold Utility (kWatt/yr)	AC_{11} (m ²)	Total Cost (\$/yr)	Units
1	1.1927	184.540	163.67	199.20	51289.69	10
0.9	1.6091	179.554	158.686	208.96	51526.68	10
0.8	2.2725	178.524	157.656	198.57	50513.49	10
0.7	3.1658	178.045	157.177	199.06	50543.88	10
0.6	4.3907	178.62	157.45	202.44	50856.12	10
0.5	6.0510	180.293	159.425	206.86	51436.04	10
Optimization Results:						
$k_{Opt}=2.2725$ $Z_{Opt}=0.8$		Hot Utility=178.524 kW Cold Utility=157.656 kW		$A_{min,11}=213.46$ m ² Total Cost=52311.39 \$/yr		

جدول ۱۰: نتایج بدست آمده در k و Z بهینه.

FixedD P with $K_{Opt}=2.2725$ & $Z_{Opt}=0.8$			
Streams	$AC_{j,11}$ (m ²)	h_{Fouled} (kW/m ² °C)	h_{Clean} (kW/m ² °C)
H1	76.035	0.1069	0.1086
H2	20.051	0.0425	0.0427
H3	38.843	0.531	0.564
Hot Utility	63.645	0.05	---
C1	71.896	0.0114	0.1146
C2	91.607	0.4326	0.4528
Cold Utility	35.072	0.2	---
$k_{Opt}=2.2725$ $Z_{Opt}=0.8$			
Hot Utility=178.524 kW		$A_{min,11}=198.57$ m ²	
Cold Utility=157.656 kW		Total Cost=50513.49 \$/yr	

جدول ۱۱: مقایسه نتایج بدست آمده در k و Z بهینه با روش متداول افت فشار ثابت در سطح یکسان از مصرف انرژی.

Streams	$AC_{j,11}$ (m ²)	
	Conventional fixed pressure drop method	New method with $K_{Opt}=2.2725$ & $Z_{Opt}=0.8$
H1	138.81	76.035
H2	30.61	20.051
H3	47.308	38.843
Hot Utility	55.57	63.645
C1	168.69	71.896
C2	66.07	91.607
Cold Utility	37.53	35.072
$A_{min,11}$	272.29	198.57
Hot Utility=178.524 kW Cold Utility=157.656 kW		



شکل ۲: مقایسه ساختار جریانها در محدوده بالا و پایین پینچ برای نتایج جداول ۱۰ و ۱۱.

مقاله بر مبنای استفاده از مزیت‌های موجود در روش‌های قبلی توسعه یافته است. در این روش بجای استفاده از یک ΔT_{min} کلی برای شبکه، ΔT_i هر جریان با در نظر گرفتن ضرایب انتقال حرارت آنها در مرحله هدفگذاری تعیین میگردد. این امر امکان انتقال حرارت غیر عمودی سودمند بین جریانها، استفاده از نیروی محرکه مناسب و متناسب با ضریب انتقال حرارت جریانها در شبکه و کاهش سطح شبکه را فراهم می نماید. همچنین در بسیاری از موارد ضرایب انتقال حرارت جریانها از قبل مشخص نیستند، لذا در نظر گرفتن افت فشار مجاز جریانها در روش جدید، امکان تخمین دقیقتر ضرایب انتقال حرارت جریانها را فراهم می آورد. از طرفی در مرحله هدفگذاری و جستجو برای پارامترهای بهینه، تغییر پارامترهای k و Z منجر به تغییر میزان بازیافت حرارت و سطح تماس جریانها در شبکه میگردد. این امر تغییر ضرایب انتقال حرارت جریانها را بدنبال خواهد داشت که در روش جدید اثر این تغییرات نیز لحاظ شده است بنابراین شرایط ایجاد همخوانی بین نتایج هدفگذاری و طراحی تفصیلی شبکه فراهم گردیده است. مقایسه نتایج حاصل از بکارگیری روش متداول افت فشار ثابت و روش جدید در مسئله نمونه ۱، نشان دهنده کاهش سطح مورد نیاز شبکه در روش جدید نسبت به روش متداول در سطح یکسان از مصارف انرژی است و بیانگر کارایی بهتر این روش نسبت به روشهای متداول می باشد. بکارگیری این روش ساختاری از جریانها را در دو

مقایسه نتایج بدست آمده از روش جدید و روش متداول پینچ با ملاحظات افت فشار، بیانگر کاهش سطح مورد نیاز شبکه در مصارف یکسان انرژی در نقطه بهینه روش جدید می باشد (جدول ۱۱).

دلیل عمده تفاوت نتایج هدفگذاری روش جدید با روشهای متداول در این مسئله، تفاوتی است که در ساختار جریانها در بازه های انتالیپی و در دو محدوده بالا و پایین پینچ ایجاد میگردد. در روش جدید، جابجایی دمایی جریانها متفاوت بوده (بر خلاف روشهای متداول) و با توجه به h ، که خود تابعی از افت فشار است انجام میشود. این امر منجر به ایجاد ساختاری از جریانها در دو محدوده بالا و پایین پینچ میگردد که در آن امکان استفاده از نیروی محرکه بزرگتر برای تبادل حرارت بین جریانهای با ضرایب انتقال حرارت کم فراهم میگردد. همچنین با جابجایی دمایی بیشتر بر روی جریانهای با h کوچک، این جریانها بیشتر به سمت ناحیه مقید پینچ، جابجا شده و شرایط تبادل حرارت بین جریانهای با h نزدیک به هم را مهیا مینماید. عوامل فوق کاهش سطح مورد نیاز شبکه را در پی داشته است. هدفگذاری انرژی نیز به دلیل جابجایی دمایی متفاوت جریانها، بر خلاف روشهای متداول وابسته به ضرائب انتقال حرارت جریانها می باشد.

نتیجه گیری

روش جدید هدفگذاری ارائه شده در این

محدوده بالا و پایین پینچ ایجاد می نماید که در نهایت، کاهش هزینه شبکه را نسبت به روشهای متداول بدنبال خواهد داشت.

مراجع

- 1 - Panjeh Shahi, M. H. (1992). *Pressure drop Consideration in process integration*. Ph.D. Thesis ,UMIST , England.
- 2 - Rev, E. and Fonyo, Z. (1991). "Diverse pinch concept for Heat Exchanger Network synthesis: The case of different heat transfer conditions." *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 46, No. 7, PP. 1623-1634
- 3 - Linhoff, B. (1993). "Pinch analysis – a state – of art overview." *Chem. E. Chem. Eng. Res.*, PP. 501-522.
- 4 – Polly, G. T., Panjeh Shahi, M. H. and Jegede, F. O. (1990). "Pressure drop onsideration in the retrofit of Heat Exchanger Networks." *Trans. IChemE*, Vol. 68, PP. 211-220.
- 5 - Shenoy. (1995). *Heat Exchanger Network synthesis*. Gulf Publishing Company.
- 6 - Zhu, X. X., O'Neill, B. K., Roach, J. R. and Wood, R. M. (1995). "Area targeting methods for he direct synthesis of Heat Exchanger Networks with unequal film coefficients." *Computers Chem. Engng* Vol. 19 No.2, PP. 223.239.
- 7 - Smith, R. (1995). *Chemical process design*. McGraw-Hill Book Company.
- 8 – Fraser, D. M. (1989). "The use of minimum flux instead of minimum approach temperature as a design specification for heat exchanger networks." *Chem. Eng. Sci.*, Vol. 44 PP. 1121-1127.
- 9 – Nishimura, H. (1980). "Theory on optimal synthesis of heat exchanger systems." *J. Opt. Theory Applic.*, Vol.30 , PP. 423, 450.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- | | | |
|---------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|
| 1 – Targeting | 2 – Grass-Roots Design | 3 – Pinch Technology |
| 4 – Conventional Pinch | 5 – Shift | 6 - ΔT -Contribution |
| 7 – Beneficial Crisscrossing | 8 – Mathematical Programming | 9 –Fixed h |
| 10 – Bath Formula | 11 - Shifted Temperatures | 12 – Heat Cascade |
| 13 – Composite Curve | 14 – Shell & Tube | 15 – Area Contribution |
| 16 – ContactArea | 17 – Fouled | |
| 18 – Fouled Heat Transfer Coefficient | 19 – Clean Heat Transfer Coefficient | |
| 20 – Counter Current | | |