محاسبات تحلیل پینچ برای انتگراسیون حرارتی با استفاده از نرم افزار MATLAB

فاطمه گودرزوند چگینی ، معصومه فرخنده کواکی ، مهدی گوگل و(*) محمد محمدی‌فرد
پژوهشگاه صنعت نفت،مرکز تحقیقات انرژی
(*) دانشگاه علم و صنعت، دانشکده مهندسی شیمی

چکیده

تحلیل پینچ به عنوان ابزاری توانا برای هدف گذاری و سنتز شبکه‌های تبادل حرارتی و جرمی به کار برده می‌شود. علی‌رغم برخورداری از مفهومی ساده، این آنالیز برای اجرا، عملیات پیچیده و پرحجمی را دارا می‌باشد. این موضوع ضرورت ایجاد نرم‌افزاری را برای آنالیز پینچ بیش از پیش آشکار می کند. بدین ترتیب پس از گذشت مدتی کوتاه از پیدایش آنالیز پینچ، شرکتهای بزرگ نرم افزاری با استفاده از زبانهای برنامه‌نویسی بصری و پیشرفته، نرم‌افزارهای توانا و گرانقیمتی را به بازار عرضه کردند.

باتوجه به تعریف اکثر توابع ریاضیاتی در نرم‌افزار MATLAB و با توجه به سهولت برنامه نویسی در محیط آن، امروزه این نرم افزار در بیشتر علوم مهندسی کاربردی وسیع پیدا کرده است. بنابراین با نگارش برنامه عملیات تحلیل پینچ در محیط ویرایشگر MATLAB، قادر به یافتن حداقل یوتیلیتی‌های درخواستی، سطح بهینه شبکه، حداقل هزینه کلی سالیانه، اتصالات مناسب و حداقل اختلاف دمای بهینه شبکه، در کمترین زمان خواهیم بود. در صورتی که محدودیت های موجود در تحلیل پینچ، در این برنامه لحاظ شود جوابهای حاصل از آن با نرم افزارهای موجود در این زمینه رقابت خواهد کرد. در این مقاله با استفاده از جریانهای واحد آروماتیک توانایی های این برنامه ارائه شده، به طوری که نتایج حاصله از آن با خروجی نرم افزار $SuperTarget^{TM}$ منطبق خواهد شد.

Pinch Analysis Calculations for Heat Integration Using MATLAB Software

F. Goodarzvand, M. Farkhondeh, M. Gougol and M. Mohammadifard
Research Institute of Petroleum Industry
P.O.Box: 18745-4163,Tehran, Iran

ABSTRACT

Pinch Analysis (PA) is used as a powerful tool for targeting and synthesis of heat and mass exchange networks. PA for solving includes extended and complex operation although having a simple concept. According to this matter, need for creating a PA software is clear hence famous an American and European cooperation introduce extensive and powerful software by applying advanced programming language and visual software after a just short period of time, since PA was known. According to this matter that MATLAB software includes most of mathematical function and have an easy programming interface, this software know a days, is widely used by most of engineering and science field. Consequently, by editing the PA operation in MATLAB editor interface, minimum energy requir, optimum network area, optimum minimum temperature difference and total annual cost in the minimum short time will be reached. The result record can compete with the existing softwares. In the paper, the program ability by means of aromatic stream will be presented.

مقدمه

در اوائل دهه هشتاد میلادی همزمان با بحران های انرژی فنآوری پینچ به عنوان ابزاری برای طراحی شبکه مبدل های حرارتی پدیدار شد. اساس آن بر مبنای اصول ترمودینامیک بوده ، اهدافی غیر از انرژی را نیز دربر می‌گیرد که از جمله می‌توان به هزینه سرمایه‌گذاری، قابلیت عملکرد و انتشار آلودگی در محیط اشاره کرد. به علت آنکه این روش برای تحلیل فرایندها به کار برده می‌شود بیشتر به آن تحلیل پینچ گویند [۱].

یکی از نرم‌افزارهای پر قدرت برای انجام محاسبات طولانی آنالیز پینچ، MATLAB است. این نرم افزار یک زبان برنامه نویسی آسان با ویژگی‌های پیشرفته بوده ، استفاده از آن ساده‌تر از بقیه زبانهای برنامه نویسی همانند BASIC، PASCAL یا C می‌باشد [۲].

پیش فرض MATLAB مفهوم ماتریسی برای اعداد است که این موضوع در پردازش تحلیل پینچ مانند تعیین حداقل یوتیلیتی‌ها و نقطة پینچ توسط جدول الگوریتمی مسئله کمک فراوانی خواهد کرد. بدین ترتیب بدلیل برخورداری از قابلیت گرافیکی قوی، تعریف شدن اکثر توابع ریاضی در محیط نرم افزار و داشتن ابزارهایی برای انجام برنامه‌های کاربردی، آنرا به یک برنامه کاربردی و هوشمند برای حل مسائل تبدیل کرده است. در اینجا سعی شده که قابلیت‌های نرم افزار MATLAB برای اجرای تحلیل پینچ شرح داده شود.

روش نرم افزار MATLAB برای تحلیل پینچ

این عملیات طی سه مرحله انجام می‌پذیرد [۳]. ابتدا به هدف گذاری انرژی می‌پردازیم. در طی این مرحله نقطه پینچ را با در نظر گرفتن یک حداقل اختلاف درجه حرارت به دست آورده ، از میزان یوتیلیتی مصرفی بهینه واحد مطلع می‌گردیم. ضمناً باتوجه به منحنی ترکیبی جامع به دست آمده، قادر به انتخاب و توزیع مناسب یوتیلیتی در واحد خواهیم بود.

در مرحله دوم با همان ملاک نیروی محرکه ، می‌توان تعداد مبدل ها، پوسته‌ها و حداقل سطح شبکه مبدل های حرارتی همراه با اعمال اثر هزینه را به دست آورده ، سپس هزینه کلی سالیانه را برای حداقل اختلاف درجه حرارت مورد نظر محاسبه می‌کنیم.

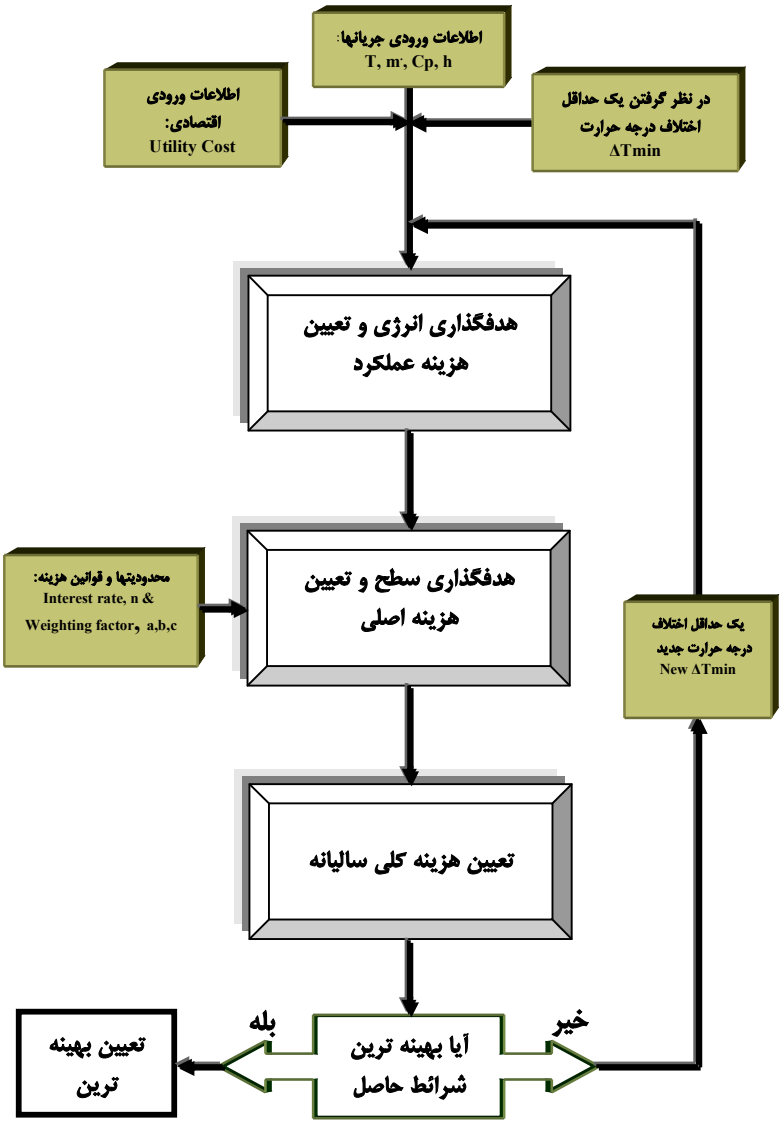
در مرحله آخر برنامه را در یک حلقه قرار داده تا برای حداقل اختلاف درجه دماهای مختلف مراحل فوق تکرار شود. آنگاه حداقل اختلاف درجه حرارتی که کمترین هزینه کلی سالیانه را به دنبال داشته باشد انتخاب کرده و سپس با این ملاک نیروی محرکه به سنتز شبکه مبدل های حرارتی خواهیم پرداخت. در نمودار۱فلوچارت برنامه نشان داده شده است. با توجه به ساختار برنامه ، مباحث جدید تحلیل پینچ نظیر Mixed Materials و Problem of Decomposition نیز قابل اجرا خواهند بود.

هدف گذاری انرژی

برای شروع باید اطلاعات جریانها را وارد کنیم. البته همان طور که قبلاً اشاره شد اعداد ثبت شده در محیط ویرایشگر MATLAB مفهوم ماتریسی پیدا خواهند کرد. در اینجا از مثال واحد آروماتیک توسط احمد و لینهوف(B.Linnhoff) بود استفاده خواهد شد[۴].

ستونهای ماتریس aa به ترتیب شامل دماهای ورودی، خروجی (بر حسب درجه سانتیگراد) و حاصلضرب دبی جرمی در ظرفیتهای گرمایی (بر حسبKW/°C) برای جریان های فرآیندی می‌باشد. ماتریس aab شامل دماهای ورودی و خروجی جریانهای یوتیلیتی بوده و ماتریس aah بیانگر ضرائب انتقال حرارت فیلمی (بر حسب$KW/m^2°C$) کل جریانها می‌باشد. قوانین هزینه مبدل ها شامل ضرایب $c_{و}b,a$ به ترتیب در ماتریس aac و قوانین هزینه مبدل های ویژه شامل ضریب b_1 در ماتریس aacs قرار گرفته‌اند. اطلاعات سالیانه شامل درصد بهره (۱۵٪) و عمر مفید (۵سال) کارخانه بر حسب سال در ماتریسAnnualizedData و همچنین هزینه‌های عملکرد با واحد پوند در سال در ماتریس Operating Cost بیان شده اند:

```
aa=[327 40 100;220 160 160;220 60 60;160 45
400;100 300 100;35 164 70;85 138 350;60 170
60;140 300 200]
aab=[330; 230;10; 30]
aah=[0.5;0.5;0.5;0.5;0.5;0.5;0.5;0.5;0.5;1;2.5]
aac=[0 700 ;0.93]
aacs=[0;0;0;0;0;0;0;0;0;0;0]
AnnualizedData=[0.15; 5]
Operating Cost=[70; 7]
Save info aa aab aah aac aacs AnnualizedData
OperatingCost
```



نمودار ۱- فلوچارت برنامه

پس از شناسایی جریان های گرم و سرد، جدول الگوریتمی مسئله را برنامه‌ریزی می کنیم و بدین وسیله برای اولین حداقل ، اختلاف درجه حرارت در نظر گرفته شده که برابر با پنج درجه سانتیگراد است، دمای نقطه پینچ و حداقل یوتیلیتی‌های درخواستی را به دست خواهیم آورد. در زیر خروجی برنامه مربوط به هدف گذاری انرژی را از پنجره فرمان MATLAB برای $\Delta T_{\min} = 5^{\circ} C$ ارایه کرده ایم.

Hotutility = -15130 KW Thpinch =160°C
Tcpinch =155°C Coldutility = 22850 KW

منحنی‌های ترکیبی تراز شده، ابزاری مهم برای آگاهی طراح از میزان انتقال حرارت بین فرایندی، یوتیلیتی‌های درخواستی و اتلاف حرارتی می‌باشد. توسط فرمان Plot و با استفاده از محیط پرقدرت MATLAB در رسم شکلها و نمودارها، منحنی‌های ترکیبی تراز شده برای اولین $\Delta T_{\min}$ در نمودار ۲ ارائه شده است.

منحنی ترکیبی جامع، بهترین و اختصاصی‌ترین ابزار برای توزیع مناسب یوتیلیتی‌ها و میزان انتقال حرارت بین فرایندی می باشد ،

به طوری که برای بهینه سازی حرارتی راکتورها، برجهای تقطیر، تبخیر کننده‌ها و خشک کننده‌ها نیز از این منحنی استفاده می‌شود [۳]. در نمودار ۲ این منحنی برای اولین $\Delta T_{\min}$ در نظر گرفته شده توسط برنامه رسم شده است.

هدف گذاری هزینه‌های اصلی و کلی

ابتدا تعداد مبدل های حرارتی را در حالت هدف گذاری شده و سپس در طراحی براساس پینچ بدست می‌آوریم. از تفاوت این دو، تعداد حلقه‌های موجود در کل شبکه را به دست خواهیم آورد. خروجی پنجره فرمان برای این محاسبات در اولین $\Delta T_{\min}$ در نظر گرفته شده که برای $5^{\circ}C$ می‌باشد در زیر ارائه شده است:

NT =10 Npd =15 LOOP =5

برای اجرای هدف گذاری سطح، منحنی‌های ترکیبی تراز شده را به فاصله های عمودی تقسیم می کنیم. بر روی هر خط فاصله دارای یک دمای سرد و متقابلاً یک دمای گرم می‌باشیم. برای تفهیم این عملیات در نرم افزار MATLAB باید از تکنیک رگراسیون خطی بهره‌مند شویم.

در یک فاصله معین مقدار ΔT_{LMTD} همواره عدد ثابتی بوده ، بین جریانهای گرم و سرد موجود در آن اتصالاتی جهت تبادل حرارتی وجود دارد. حال با توجه به ثابت نبودن ضریب انتقال حرارت کلی در بین جریان ها از معادله (۱) برای محاسبه سطح فاصله k استفاده می کنیم.

$$A_k = \frac{1}{F_T \Delta T_{LM}} \left(\sum_i^I \frac{q_i}{h_i} + \sum_j^J \frac{q_j}{h_j} \right)$$

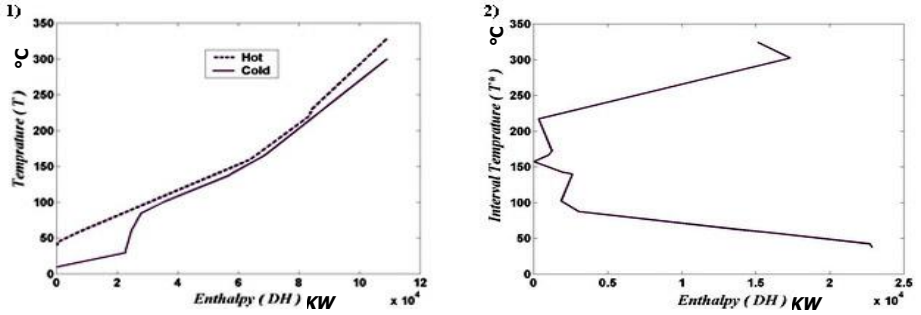
که در آن A_k= سطح تبادل حرارتی برای انتقال حرارت عمودی در فاصله k، ΔT_{LM} = میانگین اختلاف دمای لگاریتمی برای فاصله k، i= جریان گرم، j= جریان سرد، q= بار حرارتی، h=ضریب انتقال حرارت فیلمی، F_T= ضریب تصحیح انتقال حرارت برای دستیابی به حداکثر دمای تلاقی قابل پذیرش طبق قوانین سرانگشتی $F_T \geq 0.75$ و یا به عبارتی در نمودار F_T از بخش هایی که دارای شیب تند می‌باشند باید اجتناب کرد. در روش سنتی طراح با استفاده از حدس و خطا به طراحی تقریبی مبدل می‌پردازد به طوری که ابتدا یک پوسته را فرض کرده ، سپس F_T را برای آن ارزیابی می‌کند. در صورتی که مقدار F_T برای یک پوسته قابل پذیرش نباشد، تعداد بیشتری پوسته را به صورت سری در نظر می‌گیریم تا جایی که مقدار قابل قبولی از F_T برای هر پوسته به دست آید. تعداد پوسته‌ها را از فرمول های ۲ یا ۳ به دست می‌آوریم ضمناً مقدار X_p برای حداقل مقدار قابل قبول F_T انتخاب می شود. به عبارتی برای $F_T \geq 0.75$ X_p=0.9 می‌باشد.

(۲)

$$N_{shells} = \frac{\left(\frac{1-RP}{1-P}\right)}{ln\frac{R+1+\sqrt{R^2+1}-2RX_p}{R+1+\sqrt{R^2+1}-2X_p}} \quad , \quad R \neq 1$$

(۳)

$$N_{shells} = \frac{\left(\frac{P}{1-P}\right)\left(1+\frac{\sqrt{2}}{2}-X_p\right)}{X_p} \quad , \quad R = 1$$



نمودار ۲- منحنی ترکیبی تراز شده (۱) و منحنی ترکیبی جامع (۲) برای ΔTmin=5°C

که در آنها N_{shells}= تعداد کل پوسته‌ها، R= نسبت ظرفیتهای حرارتی جریان های سرد و گرم، P= اثر حرارتی، X_p= جزیی از حداکثر اثر حرارتی مجاز در یک مبدل حرارتی پوسته و لوله ۲-۱ .
اگر مبدل هائی با ویژگی های متفاوت داشته باشیم برای محاسبه هزینه شبکه باید تغییراتی در معادله (۱) ایجاد می کنیم. بدین ترتیب که یک عامل سنجش هزینه را همانند فرمول (۴) در ضریب انتقال حرارت فیلمی فاصله ای که مبدل یا مبدل های آن با سایر فاصله ها تفاوت دارد ضرب می کنیم.

$$\phi = \left(\frac{b}{b_1}\right)^{1/c} \qquad (۴)$$

که در آن b= قانون هزینه مبدل های مرجع، b_1= قانون هزینه مبدل ویژه، ϕ= فاکتور اثر هزینه، c= قانون هزینه نوع مبدل که اغلب برای ویژگی‌های مختلف ثابت می‌باشد.
بدین ترتیب با جمع سطوح فاصله ها میزان سطح کل هدف گذاری شده را به دست می‌آوریم. پس از تعیین سطح هدف‌گذاری شده با استفاده از فرمول (۵) میزان هزینه اصلی شبکه را به دست خواهند آمد.

$$\text{هزینه اصلی‌شبکه} = N\left[a + b\left(\frac{A_{network}}{N}\right)^c\right] \qquad (۵)$$

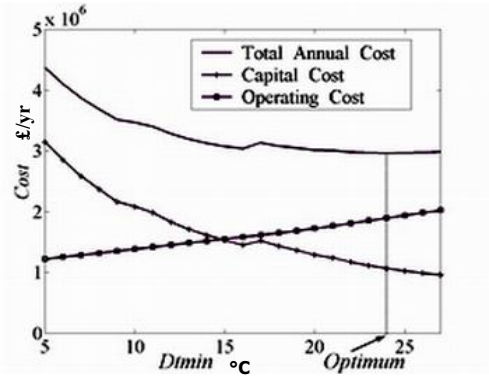
که در آن N= تعداد پوسته‌ها، c,b,a= قوانین هزینه، $A_{network}$= سطح شبکه برای تعیین هزینه کلی سالیانه باید هزینه اصلی را در فاکتور سالیانه ضرب کرده ، حاصل آنرا با هزینه عملکرد جمع کنیم. برنامه هدف گذاری سطح و هزینه های اصلی و کلی به دلیل طولانی بودن در این مقاله قابل طرح نمی‌باشد.

بررسی اثر متقابل اقتصادی

بدین ترتیب برای اولین حداقل اختلاف دما که برابر $\Delta T_{\min} = 5^{\circ}C$ بوده میزان هزینه کلی سالیانه را بدست می‌آوریم. سپس با قرار دادن برنامه در یک حلقه به ازای هر اختلاف دمای مجاز یک هزینه کلی سالیانه به دست خواهد آمد. کمترین هزینه کلی سالیانه، میزان بهینه $\Delta T_{\min}$ را نشان خواهد داد. در زیر خروجی پنجره فرمان برای نتیجه اثر متقابل ارائه شده است .

ans =2971060£ , 25°C

نمودار ۳ ، نشان دهنده نمودار هزینه براساس حداقل اختلاف دما می‌باشد و این شکل پس از پایان عملکرد هدف‌گذاری نرم افزار ایجاد می‌شود. ضمناً منحنی های ترکیبی تراز شده و منحنی ترکیبی جامع برای شرایط نهایی بهینه در نمودار ۴ نشان داده شده است . با توجه به جدول ۱ میزان حداقل اختلاف دمای بهینه شبکه مبدل های حرارتی واحد آروماتیک، که از نرم افزارهای SuperTarget™ و MATLAB به دست آمده به عنوان مهمترین ملاک برای سنتز شبکه و کاملاً با هم برابر می‌باشد.



نمودار ۳- بررسی اثر متقابل اقتصادی و تعیین شرایط بهینه

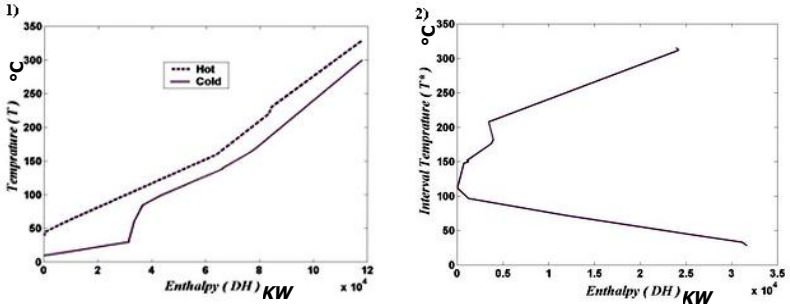
یوتیلیتی‌های گرم و سرد و بالطبع هزینه عملکرد واحد به دست آمده از هر دو نرم افزار با هم برابر است و تنها تفاوت ناچیزی را در هزینه کلی سالیانه و سطح شبکه بین این دو نرم‌افزار شاهد می باشیم. دلیل این تفاوت ناچیز در هزینه کلی سالیانه واحد و تفاوت در قانون هزینه c و احتمالاً قانون هزینه b_1 به عنوان اطلاعات ورودی دو نرم‌افزار می‌باشد.

سنتز شبکه مبدل های حرارتی

پس از تعیین حداقل اختلاف دمای بهینه که برای مثال مورد بحث مقدار آن C ۲۵ می‌باشد ، نمودار شبکه را رسم کرده و سپس به بهینه سازی شبکه و حذف حلقه ها می‌پردازیم. بدین ترتیب با کاهش هزینه اصلی مقداری هزینه عملکرد را افزایش خواهیم داد که این مطلب به معنای عبور حرارت از نقطه پینچ می‌باشد. به منظور ارزیابی اتصالات نمودار شبکه از ابزار آنالیز باقیمانده مسائل و نمودار نیروی محرکه استفاده می کنیم. بنابراین پس از سنتز شبکه باید اطلاعاتمان را در اختیار نرم‌افزار طراحی تفصیلی قرار بدهیم.

جدول۱- مقایسه نتایج نرم افزارهای موردنظر برای واحد آروماتیک

SOTWARE	ΔT_{min}	Hot Utility [kW]	Cold Utility [kW]	1-2 Area m^2	N_T	Utility Cost [£/yr]	Capital Cost [£/yr]	Total Cost [£/yr]
SUPER TARGET™	25	24480	32200	12691	15	1939000	1100953	3039953
MATLAB	25	24480	32200	12889	15	1939000	1024807	2971060



نمودار۴- منحنی ترکیبی تراز شده (۱) و منحنی ترکیبی جامع (۲) برای Δtmin=25°C

مسئله افت فشار

تمامی عملیات فوق براساس ضریب انتقال حرارت فیلمی ثابت انجام گرفته است اما به دلیل آن که طراحی تفصیلی با توجه به افت فشار مجاز پوسته و لوله انجام می‌پذیرد، اختلاف زیادی بین هزینه های هر دو مرحله ایجاد می‌شود. برای حل چنین مشکلاتی باید محاسباتمان را در افت فشار ثابت انجام دهیم. افت فشار بر خلاف ضریب انتقال حرارت کاملاً در کنترل طراح است. بنابراین ملاکمان برای تعیین سطح تغییر کرده ، با حل همزمان سه معادله زیر سطح هدف گذاری شده را به دست می‌آوریم [۵]. در نتیجه مقادیر افت فشار جریان ها نیز باید وارد ماتریس aa شود و تمام عملیات براساس تدبیر جدید اجرا می شود.

$$\Delta P_1 = k_1 A h_1^m \qquad (۶)$$

$$\Delta P_2 = k_2 A h_2^n \qquad (۷)$$

$$\frac{Q}{\Delta T_{LM}} = A\left(\frac{1}{h_1}+\frac{1}{h_2}+R_f\right)^{-1} \qquad (۸)$$

که در آنها 1= لوله، 2= پوسته، ΔP =افت فشار، A= سطح مبدل حرارتی، h= ضریب انتقال حرارت فیلمی، R_f= ضریب گرفتگی، Q= بار حرارتی مبدل، ΔT_{LM} = میانگین دمای لگاریتمی، n,m= ضرائب ثابت وابسته به مدل انتقال حرارت

بحث و نتیجه گیری

در مواردی که فرایند مورد نظر از تعداد زیادی جریان برخوردار باشد، تحلیل پینچ برای رسیدن به جواب به نرم‌افزار نیاز خواهد داشت. به دلیل هزینه بالای نرم‌افزارهای مطرح موجود، اغلب دانشجویان و محققین امکان دستیابی به آنها را نخواهند داشت. با توجه به قابلیت زیاد نرم افزار MATLAB در انجام محاسبات ریاضی، سادگی کار با محیط برنامه نویسی و سهولت دسترسی به آن، می‌توان تحلیل پینچ را درون این محیط برنامه ریزی کرد و به تمامی خواسته‌های آنالیز پینچ دست یافت. هر چه کاربران با جزئیات بیشتری به برنامه نویسی بپردازند جواب های حاصل از نرم افزار، صحیح‌تر خواهند بود.

منابع

[1] Linnhoff, B., "Pinch analysis – A state of art overview", Trans, IChemE, Vol. 71, Part A5, PP.503-522, 1993.

[۲] جباریه، ع.، "مرجع کامل MATLAB" ، انتشارات ارس رایانه، تهران، ۱۳۷۷.

[۳] عمیدپور، م. و گوگل، م.، "تکنولوژی پینچ – بهینه سازی انرژی"، انتشارات نشر جهاد، تهران، ۱۳۸۰ .

[4] Linnhoff, B. and Ahmad, S., "Cost Optimum heat exchanger networks" Computers Chem. Eng., Vol.14, PP.729, 1990.

[5] Polley, G.T., Panjeh Shahi, M.H. and Jegede, F.O., "Pressure drop consideration in the retrofit of heat exchanger networks" Trans. IChemE, Vol.68,Part.A, 1990.