تاثیر تغییرات خواص فیزیکی سیالات بر سطح شبکه مبدلهای حرارتی

محمدحسن پنجه‌شاهی
استادیار گروه مهندسی شیمی - دانشکده فنی - دانشگاه تهران
ژاله قاسم زاده
کارشناسی ارشد - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

چکیده

امروزه پیشرفتهای چشمگیر Pinch Technology در طراحی شبکه مبدلهای حرارتی بر کسی پوشیده نیست. الگوریتم لازم جهت تخمین سطح تبادل حرارت این شبکه‌ها مدام دقیق و دقیقتر می‌گردد. الگوریتم جدیدی که بر اساس افت فشار مجاز جریانهای فرآیند میزان حداقل سطح مورد نیاز شبکه را پیش‌بینی می‌نماید، قادر است محدودیتهای هیدرودینامیکی واحدها را نیز در نظر بگیرد. لیکن این الگوریتم چون بر اساس خواص فیزیکی ثابت کار می‌کند طبیعتاً از دقت بسیار بالائی برخوردار نخواهدبود.

در این تحقیق سعی گردیده تا روابط مربوط به تغییرات خواصی چون دانسیته، ظرفیت حرارتی، ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی با دما مورد استفاده قرارگرفته و الگوریتم جدیدتری پیشنهاد گردد. این الگوریتم در هر فاصله انتالپی روی منحنی‌های مرکب فرآیند، خواص فیزیکی جریانها را تخمین زده وبااستفاده از ارقام بدست آمده، سطح تبادل در هر فاصله انتالپی را محاسبه می‌نماید. همچنین با بکاربردن این الگوریتم در یک مسئله نمونه مشخص گردید که دقت نتایج حاصله نسبت به نتایج قبلی از ده درصد بهبود برخورداراست.

مقدمه

شبکه مبدلهای حرارتی یکی از مهمترین قسمت‌های هر فرآیند بشمار می‌رود. زیرا طراحی صحیح این قسمت است که ما را نسبت به استفاده بهینه از انرژی و سرمایه مطمئن می‌سازد. لذا تلاشهای بسیاری در جهت افزایش دقت روشهای هدفگذاری و طراحی این شبکه‌ها صورت گرفته که یکی از آنها الگوریتم جدیدی است که نه بر اساس ضرائب انتقال حرارت مفروض برای جریانها، بلکه بر اساس افت فشار مجاز آنها کار می‌کند[۴]. در این الگوریتم ضرائب انتقال حرارت جریانها با استفاده از خواص فیزیکی و متناسب با افت فشار مجاز مربوطه محاسبه میگردد. بکاربردن این روش در طراحی شبکه از پایه (Grass - root) تضمین می‌نماید تا نتایج طراحی شبکه با نتایج طراحی تفصیلی مبدلها همخوانی داشته‌باشد. همچنین این الگوریتم در طراحی اصلاحی شبکه‌ها (Retrofit) قادر است تا شبکه جدیدی در چارچوب محدودیتهای هیدرودینامیکی شبکه (پمپ‌ها و کمپرسورهای موجود).ارائه نماید[۵]. لیکن تنها نقطه ضعف این الگوریتم اینست که خواص فیزیکی هر جریان را که شامل دانسیته، ظرفیت حرارتی، ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی است در یک دمای متوسط بین دماهای ابتدائی و انتهایی آن جریان بکار برده و تغییرات آنها را با دما در طول جریان در نظر نمی‌گیرد. لذا انتظار میرود که سطح شبکه محاسبه‌شده از دقت خیلی بالائی برخوردار نباشد.

برای رفع مشکل فوق ابتدا لازم است تا روابط ساده‌ای که بتواند با داشتن خواص فیزیکی در دماهای ابتدایی و انتهایی، مقدار آن خواص را در هر دمای میانی تخمین بزند بدست آید[۹]. همچنین این روابط باید به نوعی در الگوریتم سطح شبکه مورد استفاده قرارگیرد که الگوریتم بتواند در هر فاصله انتالپی روی منحنی‌های مرکب مقادیر دقیق خواص فیزیکی را در آن فاصله تخمین و در محاسبه سطح بکار ببرد. در ادامه این مقاله به روابط بدست آمده برای محاسبه خواص فیزیکی، نحوه محاسبه حداقل سطح شبکه، حل مسئله نمونه با استفاده از الگوریتم جدید و مقایسه نتایج حاصله اشاره خواهدشد.

تخمین خواص فیزیکی

درالگوریتم محاسبه حداقل سطح شبکه، اطلاعات مربوط به خواص فیزیکی جریانها در دماهای ابتدایی و انتهایی هر جریان موجود می‌باشد. در الگوریتمهای موجود متوسط حسابی خواص فیزیکی هر جریان در دو دمای ابتدایی و انتهایی آن جریان در محاسبات استفاده می‌شود. بمنظور افزایش دقت الگوریتم محاسبه حداقل سطح شبکه، بهتر است خواص فیزیکی مورداستفاده در محاسبات در دمای متوسط هر فاصله دمایی روی منحنی های مرکب محاسبه شوند. بنابراین ارائه روشهای تخمین خواص فیزیکی در طول جریان، لازم به نظر می‌رسد. روابط مورد نیازی که نظرات فوق را تامین نمایند در مطالعات قبلی نویسندگان این مقاله بدست آمده‌اند [۹،۱۰] در اینجا به طور خلاصه و فهرست وار به این روابط اشاره می‌شود:

الف - ظرفیت حرارتی : بمنظور تخمین ظرفیت حرارتی در دماهای بین دو دمای ابتدایی و انتهایی یک جریان از یک چند جمله‌ای درجه ۲ استفاده می‌گردد. برای محاسبه سه ضریب معادله فوق، سه نقطه معلوم مورد نیاز است که نقطه ابتدایی و انتهایی آن جزو معلومات می‌باشند. نحوه محاسبه نقطه سوم برای گازها و مایعات بشرح زیر است.

گازها $Cp_2 = (Cp_1 \times Cp_3^2)^{1/3}$

مایعات (۱) $Cp_2 = (2Cp_1 + Cp_3)/3$

ب - دانسیته : برای گازها و مایعات از درون‌یابی خطی بشرح زیر استفاده می‌شود:

گازها $V_2 = 1/\rho = V_1 + \frac{V_3 - V_1}{T_3 - T_1} (T_2 - T_1)$

مایعات (۲) $\rho_2 = \rho_1 + \frac{\rho_3 - \rho_1}{T_3 - T_1} (T_2 - T_1)$

ج - هدایت حرارتی:

گازها $k = k_2 \ (\frac{T_2 + C_k}{T + C_k}) \ (\frac{T}{T_2})^{3/2}$

مایعات (۳) $k = k_1 + \frac{k_2 - k_1}{T_2 - T_1} (T - T_1)$

د - ویسکوزیته :

گازها $\mu = \mu_1 \ (\frac{T}{T_1})^b$

مایعات (۴) $\ln \mu = A + \frac{B}{T}$

اکنون با توجه به روابط فوق که شرح مفصل آن در مراجع ۹ و ۱۰ آمده است می توان الگوریتم جدیدی نوشت که ابتدا از روی مقادیر خواص فیزیکی در دو دمای اتبدایی و انتهایی هر جریان ، مقادیر خواص فیزیکی در دماهای متوسط هر فاصله دمایی روی منحنی های مرکب فرایند را محاسبه و سپس سطح تبادل حرارتی در هرفاصله دمایی را محاسبه نماید.

الگوریتم محاسبه سطح شبکه بر اساس افت فشار مجاز جریانها

اغلب روشهای محاسبهٔ حداقل سطح موردنیاز شبکه براساس مدل انتقال حرارت عمودی در فاصله‌های دمایی مختلف روی منحنی های مرکب می‌باشند.

محاسبه حداقل سطح براساس ضریب انتقال حرارت (h) ثابت[۱،۲،۷،۸]

حداقل سطح مبدل حرارتی (A_{min}) برای کل شبکه را

می‌توان از طریق "محدوده‌های انتالپی بر روی‌منحنی‌های مرکب، و استفاده از معادلهٔ ارائه شده توسط Townsend و Linnhoff (1984) برآورد نمود :

$$A_{min} = \sum_{i=1}^{I} \left(\frac{1}{\Delta T_{LM,i}}\right) \sum_{j=1}^{J} \left(\frac{q_{ij}}{h_j}\right) \qquad (۵)$$

که در آن، $\Delta T_{LM,i}$: متوسط لگاریتمی اختلاف درجه حرارت محدودهٔ انتالپی iام روی منحنی های مرکب، q_{ij} : بار حرارتی جریان jام در محدودهٔ انتالپی iام، h_j : ضریب انتقال حرارت جریان jام (شامل مقاومت فیلمی، دیواره و h کثیفی) می‌باشد.

در الگوریتم مرتبط به محاسبهٔ حداقل سطح شبکه براساس افت فشار ثابت جریانها[۳،۴] و به منظور بدست آوردن معادلات‌لازم برای برآورد حداقل سطح شبکه معادلهٔ (۵) بفرم تغییرشکل یافته زیر بیان شده است :

$$A_{min} = \sum_{j=1}^{J} A_j \qquad (۶)$$

$$A_{min} = \sum_{i=1}^{I} \left(\frac{q_{ji}}{\Delta T_{LM,i}}\right)\left(\frac{1}{h_i}\right) \qquad (۷)$$

که در آن A_j اصطلاحاًسهم جریان jام در مساحت کل موردنیاز "Area contribution of stream j" نامیده می‌شود. I ،تعداد intervalهائی است که جریان j در آنها وجود دارد. رابطه بین افت فشار مورد نیاز برای هر جریان ، ضریب انتقال حرارت مربوطه و سطوح تبادل نصب شده روی آن جریان نیز به شکل زیر بیان میشود(۴):

$$\Delta P_j = k_j A_{cj} (h_{cj})^m \qquad (۸)$$

که در آن، ΔP_j : افت فشار مجاز جریان jام، k_j : مقدار ثابت مربوط به جریان jام، A_{cj} : سطح تبادل نصب شده بر روی جریان jام (سطح تماس)، h_{cj} : ضریب انتقال حرارت تمیز جریان jام، می‌باشند. مقدار m برای جریان سمت لوله معادل 3.5 و برای سمت پوسته 4.412 میباشد.

بدلیل تفاوت بین مساحت‌های تعریف شده (A) در معادلات فوق، حل همزمان این معادلات امکانپذیر نیست و باید سطوح مورد استفاده در روابط را یکسان تعریف نمود. همانگونه که ملاحظه میشود، معادلهٔ برآورد سطح شبکه برمبنای سهم هر جریان در برآورد سطح کل نوشته شده است ، در حالیکه در معادلات افت فشار، سطح واقعی مبدل‌ها موردنظر است. مفهوم سطحی که در رابطهٔ افت فشار ظاهر گردیده سطح تماس واقعی است که در آن مقاومتهای حرارتی هر دو جریان ایفای نقش می‌نمایند. برای اینکه بتوان سهم سطح هر جریان را به سطح تماس واقعی تبدیل نمود، کافی است که به مقاومت حرارتی موجود، مقاومت حرارتی جریان یا جریانهای مخالف را نیز بیفزائیم. این مقدار براساس مدل اسپاکتی برای جریانهای مقابل جریان j ام تخمین زده میشود که نهایتاً رابطه زیر را خواهد داد:

$$A_{cj} = \sum_{i=1}^{I} \left(\frac{q_{ji}}{T_{LM,i}}\right) \left(\frac{1}{h_{ij}} + R_{opp,j}\right)_i \qquad (۹)$$

در رابطه بالا

$$R_{opp,ij} = \sum_{k=1}^{K} \left[\frac{CP_k}{\sum_{k=1}^{K} CP_k}\right] \frac{1}{h_k} \qquad (۱۰)$$

که در آن، A_{cj} : سطح تماس جریان jام، $R_{opp,ij}$: مقاومت جریانهای مقابل جریان jام در همان محدوده حرارتی، K : تعداد جریانهای مقابل جریان jام در همان محدودهٔ حرارتی، CP_k : گرمای ویژه جریان kام، h_k : ضریب انتقال حرارت جریان kام، می‌باشند.

حال سطح شبکه را برمبنای سطوح تماس جریانها بفرم زیر می‌توان بیان نمود،

$$A_{min} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{J} A_{cj} = \sum_{j=1}^{J} A_j \qquad (۱۱)$$

مسئله دیگر، اختلاف بین ضریب انتقال حرارت مورد استفاده در رابطه افت فشار (h تمیز) و در معادلهٔ سطح شبکه (h کثیف) می‌باشد. مشکل فوق براحتی از طریق معادلهٔ زیر حل خواهد شد:

$$h_j = \frac{h_{cj}}{1 + R_{fj} h_{cj}} \qquad (۱۲)$$

الگوریتم جدید محاسبه حداقل سطح شبکه بر اساس افت فشار ثابت و خواص فیزیکی متغیر با دما[۹]

برای بدست آوردن معادلات لازم جهت برآورد سطح شبکه معادله (۶) بفرم زیر بازنویسی میشود:

$$A_j = \sum_{i=1}^{I} \sum_{j=1}^{J} A_{ij} \qquad (۱۳)$$

که در آن A_{ij} بفرم زیر تعریف می‌گردد :

$$A_{min} = \sum_{j=1}^{J} A_{ij} = \sum_{i=1}^{I} (\frac{q_{ij}}{T_{LM,i}})(\frac{1}{h_{ij}}) \qquad (۱۴)$$

روابط مربوط به افت فشار بفرم زیر خواهند بود.

$$\Delta P_{ij} = k_{ij}\, A_{cij}\, (h_{cij})^m \qquad (۱۵)$$

که در آن، k_{ij} : مقدار ثابت مربوط به جریان jام در فاصله دمایی iام است که خصوصیات فیزیکی در دمای متوسط دو سر محدودهٔ انتالپی محاسبه می‌گردند و نیز :

$$\Delta P_j = \sum_{j-1}^{1} \Delta P_{ij} \qquad (۱۶)$$

به منظور یکسان کردن تعریف سطح در معادلات فوق درست مانند الگوریتم قبل عمل میشود:

$$A_{cij} = (\frac{q_{ij}}{\Delta T_{LM,i}})(\frac{1}{h_{ij}} + R_{opp,ij}) \qquad (۱۷)$$

$$R_{opp,ij} = \sum_{k=1}^{K} \left[\frac{CP_k}{\sum_{k=1}^{K} CP_k}\right] \frac{1}{h_{ki}} \qquad (۱۸)$$

و نیز:

$$h_{ij} = \frac{h_{c,ij}}{(1 + R_{fj}\, h_{c,ij})} \qquad (۱۹)$$

برای حل این معادلات باید بتوان بنوعی افت فشار را در طول مسیر یک جریان در محدودهٔ انتالپی مختلف توزیع نمود.برای این منظور فرض میشود سرعت سیال در طول مسیر ثابت است و پارامترهای طراحی برای مبدلها در شبکه یکسان میباشد. بدین ترتیب، معادلات لازم جهت تقسیم افت فشار در فواصل دمائی مختلف بشرح زیر ارائه خواهد گردید:

$$\Delta P_{t,ij} \propto \rho_{t,ij}^{0.8}\, \mu_{t,ij}^{0.2}\, A_{cij} \quad \text{قسمت لوله} \qquad (۲۰)$$

$$\Delta P_{S,ij} \propto \rho_{S,ij}^{0.8}\, \mu_{S,ij}^{0.2}\, A_{cij} \quad \text{قسمت پوسته} \qquad (۲۱)$$

بمنظور تعیین افت فشار جریان jام در فاصله دمائی iام می‌توان بفرم زیر افت فشار مربوطه را براساس افت فشار کل جریان بدست آورد.

$$\Delta P_{ij} = (\frac{\rho^{0.8}_{ij}\, \mu^{0.2}_{ij}\, A_{cij}}{\sum_{i-1}^{1} \rho^{0.8}_{ij}\, \mu^{0.2}_{ij}\, A_{cij}})\, \Delta P_j \qquad (۲۲)$$

با در دست داشتن معادلات لازم می‌توان الگوریتم جدید سطح را اجرا نمود. با حل دستگاهی شامل 2ij+1 معادله‌میتوان 2ij+1 مجهول (A_{ij} و h_{ij} و A_{min}) را بدست آورد.

جدول ۱ - اطلاعات مربوط به خواص فیزیکی جریانها در دماهای ابتدایی و انتهایی

STREAM	ρ (kg/m³)		CP(J/kg.k)		K(kw/m.K)		μ (cP)		R	Δp
	@T_s	@T_t	@T_s	@T_t	@T_s	@T_t	@T_s	@T_t	m² °C/W	KPa
H1	740	860	2646	2554	0.100	0.140	0.28	0.72	0.00018	20
H2	740	860	2646	2554	0.100	0.140	0.28	0.72	0.00018	30
ST	800	800	2600	2600	0.120	0.120	0.50	0.50	0.00018	30
C1	860	740	2554	2646	0.140	0.100	0.72	0.28	0.00018	10
C2	860	740	2554	2646	0.140	0.100	0.72	0.28	0.00018	60
CW	1001	999	4185	4189	0.585	0.635	1.20	0.80	0.00018	60

حل مساله نمونه

بـه مـنظور اسـتفاده از الگـوریتم جـدید و اعـمال تغییرات خواص فیزیکی در طول جـریان‌ها از مسـئله چـهار جـریانه Sagli و هـمکاران [۶] اسـتفاده شـد. اطلاعات مربوط به خواص فـیزیکی، مـقاومت کـثیفی جـریان وافت فشـار مـجاز آن تـوسط نـویسنده [۴] اضـافه شـده‌است. از آنـجا کـه خـواص فـیزیکی در دمـاهای ابـتدایـی و انـتهایی هـر جـریان مـورد نـیاز می‌باشند و خواص فـیزیکی مـتوسط ارائـه شـده نـیز مربوط به مواد آلی هستند، براین اسـاس خـواص در دمـاهای ابـتدایـی و انـتهایی جـریان بـطور تـخمینی محاسبه گردید. اطلاعات مربوط به مسـئله نـمونه در جدول (۱) آمده‌است.

نتیجه‌گیری

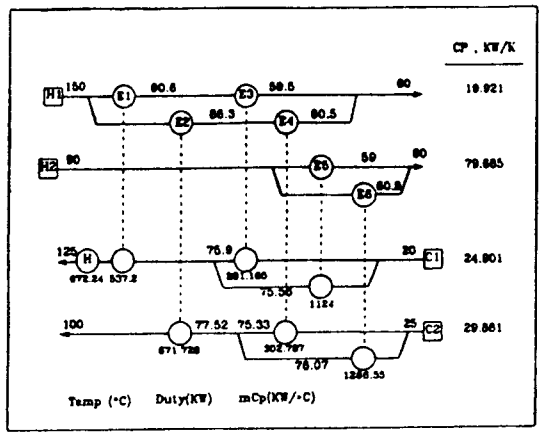
مراحل هدفگذاری، سنتز و طراحی تفصیلی شـبکه با استفاده از الگوریتم جدید و اطلاعات ارائه شده در جدول (۱) انجام گردید. مـرحـله هـدفگذاری بـا ΔT_{min} معادل $12.5\ ^0C$ که اختلاف دمای آستانه است انجام و میزان حداقل انرژی مـصرفی و سـطح تـبادل لازم در این مرحله بدست آمد. در مرحله طـراحـی شـبکه ، بـا استفاده از روش پینچ ، تعداد ۷ مبدل حرارتی بگونه‌ای روی جریانها قرارگرفتند کـه عـمل انـتقال حـرارت در آنـها حـتی الامکـان بـصورت عـمودی انـجام شـود (شکل۱). و بالاخره در مرحله طراحی تفصیلی مـبدلها بر اساس افت فشارهای مجاز و خـواص فـیزیکی در متوسط دمای ورودی و خروجی، طـراحـی گـردیدند. کلیه ایـن مـحاسبات تـوسط فـرم‌افـزار PILOT انـجام گرفت.

خلاصه نتایج حاصل از محاسبات فوق در جدول (۲) آمده‌است.

همانطور که در جدول (۲) ملاحظه می‌گردد، دقت نتایج مرحله هدف‌گذاری به میزان ٪۱۰، مرحـله سـنتز به میزان ٪ ۹/۶ و مرحله طـراحـی تـفصیلی بـه مـیزان ٪۶/۷ افزایش یافته‌است.

نکته قابل توجه دیگری که در جدول شماره ۲ مشاهده میشود اینست که مقدار سطح تبادل حرارتی محاسبه شده در مرحله طراحی تفصیلی بیشتر از مقدار بدست آمده در مرحله سنتز شبکه است . علت این امر اینست که در طراحی جـزئی مـبدلها مـقدار بکـار رفـته بـرای خصوصیات فـیزیکی مـتوسط حسـابی دو مـقدار در دماهای ابتدایی و انتهایی سرتاسر جریان است . لذا چنانچه این مقادیر در دمای متوسط هر مبدل محاسبه شوند، قطعاً تطابق خوبی بین نتایج ۲ مرحله سـنتز و طراحی تفصیلی خواهیم داشت .

قدردانی :نویسندگان این مقاله از دانشگاه تـهران کـه اعـتبارات مـوردنیاز ایـن پـژوهش را در اخـتیار گذاشته‌اند سپاسگذاری می نمایند.



شکل ۱ - شبکه حاصل از سنتز برای مسئله فوق

جدول ۲ : نتایج حاصل از سه مرحله هدف‌گذاری، سنتز و طراحی تفصیلی برای دو روش قبلی و جدید

روش	روش قبلی		روش جدید	
Stages of the Solution	Energy need (KW)	Network Area (m^2)	Energy need (KW)	Network Area (m^2)
Targeting	675	483.9	672.24	439.68
Network Design	675	484.1	672.24	441.78
Detailed Design	675	480.2	672.24	450.10

فهرست علائم اختصاری

A سطح تبادل حرارتی (m^2)

b ضریب ثابت در تخمین ویسکوزیته ($b = \frac{\ln(\mu_1/\mu_2)}{\ln(T_1/T_2)}$)

Ck ضریب ثابت در محاسبه هدایت حرارتی $C_k=(\frac{T_2-AT_1}{A-1})$ که در آن $A=\frac{k_1/k_2}{(T_1/T_2)^{3/2}}$

C_p ظرفیت حرارتی

CP حاصلضرب دبی جرمی و ظرفیت حرارتی (mC_p)

f فاکتور اصطکاک

h ضریب انتقال حرارت فیلمی (W/m^2k)

k ضرائب ثابت در روابط افت فشار

P فشار (Pa)

q بار حرارتی (W)

T درجه حرارت (K)

V حجم مخصوص ($V = 1/\rho$)

μ ویسکوزیته ($N.s/m^2$)

ρ دانسیته (kg/m^3)

مراجع

1 - Linnhoff, B., and Vredeveld, D.R.(1984). "Pinch Technology has Come of Age."*Chem. Eng. Prog.*, Jul.,33

2 - Linnhoff, B., et al.(1982). *User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy*. I ChemE, England.

3 - Palen, J.W.(1986). *Heat Exchanger Source book*. Hemisphere.

4 - Panjeh Shahi, M.H. (1992). *Pressure Drop Consideration in Process Integration*. Ph.D. Thesis, University of Manchester, Feb.

5 - Polley, G.T., Panjeh Shahi, M.H., and Jegede, F.O.(1990). "Pressure Drop consideration in the Retrofit of Heat Exchanger Networks." *Trans. IChemE,* Vol. 68, Part A, May.

6 - Sagli et al.(1990). *Topology Traps in Evolutionary Strategies for Heat Exchanger NetWork Synthesis*. Computer Application in Chemical Engineering, ed.,H. BusseMakerr & P. Iedema, Elsevier, Amsterdam.

7 - Tjoe, T.N., and Linnhoff,B. (1986). "Using Pinch Technology for Process Retrofit." *Chem. Eng.,* Apr., 28.

8 - Townsend, D.W., and Linnhoff, B.(1984). *Surface Area Target for Heat Exchanger Networks*. I ChemE Annual Research Meeting, Bath.

۹ – قاسم زاده، ژ. "مطالعه تغییرات خواص فیزیکی و ترمودینامیکی در طراحی شبکه مبدلهای حرارتی." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی ،دانشگاه تهران، (۱۳۷۴).

۱۰ – قاسم زاده، ژ. پنجه شاهی، م.ح. " تخمین خواص فیزیکی سیالات برای استفاده در الگوریتم سطح شبکه مبدلهای حرارتی" دومین کنگره ملی مهندسی شیمی ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، (۱۳۷۵).