

## شبیه سازی اواپراتور های انبساط مستقیم

<sup>1</sup>علیرضا محمدزاده

<sup>2</sup>مهدی اشجعی

<sup>1</sup>کارشناس مهندسی مکانیک، واحد تحقیقات شرکت سرما آفرین؛ a.mohammadzadeh\_mec@yahoo.com

<sup>2</sup>کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، واحد تحقیقات شرکت سرما آفرین؛ m\_ashjaei@yahoo.com

### چکیده

شبیه سازی اواپراتور انبساط مستقیم<sup>1</sup> دارای لوله های میکرو فین به روش تام<sup>2</sup> توسط کد نویسی به زبان مطلب<sup>3</sup> انجام گرفته است. محاسبه ی سطح کل انتقال حرارت مورد نیاز، به علت تغییر کیفیت و ضریب انتقال حرارت در راستای لوله به صورت المان گیری و حل المانها از روش دیفرانسیلی صورت گرفته است.

کد مورد نظر بر اساس بار حرارتی مورد نیاز، تعداد پاس، تعداد لوله ها در هر پاس، درجه سوپر هیت مورد نیاز خروجی مبرد و اطلاعاتی از قبیل تعداد بافل، نوع لوله و دانسیته ی فین در لوله، طول لوله ی مورد نیاز برای این طراحی را به صورت خروجی ارائه می دهد. بدین وسیله می توان با تغییراتی مانند نوع مبرد، تعداد لوله در هر پاس و نیز تعداد بافل ها به طراحی محصولات جدید و یا بهینه سازی محصولات قبلی پرداخت. نتایج خروجی از این کد با نمونه های عملی اواپراتور ساخته شده مقایسه شده و بر درستی کد صحت گذاری شده است. در نهایت نمونه ی استفاده از این برنامه برای طراحی محصولات جدید ذکر شده و کلیه ی نتایج در جداول ارائه شده است.

**کلمات کلیدی:** اواپراتور، شبیه سازی، لوله های دارای میکرو فین

### مقدمه

طراحی محصولات جدید و بهینه سازی محصولات موجود منطبق با پیشرفت های تکنولوژی همواره از دغدغه های سازندگان تجهیزات تهویه مطبوع جهت حضور در بازارهای رقابتی بوده است. امروزه استفاده از لوله های بهینه<sup>4</sup> بمنظور افزایش راندمان تجهیزات برودتی و بخصوص چیلرهای آبی امری متداول است. لذا شرکت های سازنده خواهان دستیابی به توان طراحی بر اساس این لوله ها جهت بروزرسانی محصولات خود هستند

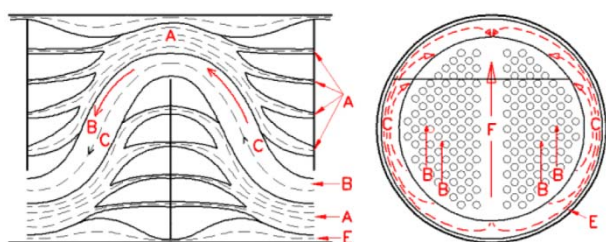
مقاله حاضر گزارش شبیه سازی اواپراتور های انبساط مستقیم بر اساس لوله های دارای میکروفین می باشد که در حال حاضر در صنعت مورد استفاده قرار می گیرد. نتایج این شبیه ساز که با استفاده از نرم افزار مطلب کدنویسی شده است در تناژهای مختلف تطابق بسیار

خوبی با عملکرد محصولات موجود در شرایط استاندارد نشان می دهد.

### محاسبات ضریب انتقال حرارت در سمت پوسته:

محاسبه ضریب انتقال حرارت سمت پوسته با استفاده از روش تبورک<sup>5</sup> [1] برای جریان های تک فاز انجام می پذیرد. در این روش ضرایب انتقال حرارت و افت فشار بعنوان تابعی از هندسه دسته لوله و ویژگی های ابعادی آن در نظر گرفته می شود. نخستین بار تینکر<sup>6</sup> [2] ویژگی های این روش را بیان کرد که بعدها در توسعه روش دلور<sup>7</sup> بکار گرفته و توسط بل<sup>8</sup> [3] منتشر شد. تبورک این نسخه جدید را در سال 1983 ارائه نمود. نسخه تبورک، از روش دلور دقیق تر و مطمئن تر بوده و کامل ترین روش موجود شناخته می شود.

در یک مبدل حرارتی پوسته و لوله، عملاً تنها بخشی از جریان سمت پوسته بصورت ایده آل و در جهت عمود بر محور لوله ها حرکت کرده و بخش باقیمانده جریان از نواحی کنار گذر عبور می کند. چنانچه مورد انتظار است، جریان مسیری را که از ابتدا تا انتهای مبدل مقاومت کمتری داشته باشد انتخاب می نماید. معمولاً جریان غیرایده آل تا 40 درصد جریان کل را در برمی گیرد، بنابراین محاسبه اثر این بخش در انتقال حرارت و افت فشار اجتناب ناپذیر است. در شکل 1 جریان کلی به چندین جریان مجزا تقسیم شده است.



شکل 1 - مسیرهای جریان در سمت پوسته

جریان A: جریان گذرنده از فضای بین سطح خارجی لوله و سطح داخلی سوراخ بافل.

جریان B: جریان ایده آل عبوری در جهت عمود بر محور دسته لوله.

<sup>5</sup> Taborek

<sup>6</sup> Tinker

<sup>7</sup> Delaware

<sup>8</sup> Bell

<sup>1</sup> Direct Expansion Evaporator

<sup>2</sup> Thome

<sup>3</sup> Matlab

<sup>4</sup> Enhanced

### محاسبات ضریب انتقال حرارت در داخل لوله:

در محاسبات ضریب انتقال حرارت در این قسمت از روش تام [4] که روابطی را برای لوله های دارای میکرو فین ارائه کرده استفاده شده است. این روابط در حالت دو فازی زمانی که کیفیت تا 85 درصد می باشد قابل استفاده است. در این روش ضریب انتقال حرارت از روابط زیر محاسبه می شود.

$$\alpha_{mf} = E_{mf}[(\alpha_{nb})^3 + (E_{RB}\alpha_{cb})^3]^{1/3} \quad (2)$$

که در آن  $\alpha_{nb}$  بر اساس روابط جوشش استخری<sup>9</sup> کوپر [5] محاسبه می شود.

$$\alpha_{nb} = 55P_r^{0.12}(-\log_{10}P_r)^{-0.55}M^{-0.5}q^{0.67} \quad (3)$$

که در این روابط  $p_r$  بیانگر فشار کاهشده شده می باشد و  $M$  نیز بیانگر جرم مولکولی میرد و مقدار  $q$  بیانگر شار گرمایی محلی می باشد. ضریب انتقال حرارت به هنگام جوشش در جریان افقی بر روی فین های افقی (داخل لوله) بر اساس ضریب تصحیحی که تام [6] ارائه کرده است به دست می آید. در این رابطه برای ضریب تصحیح انتقال حرارت در جریان آشفته داخل لوله ی بدون فین داریم:

$$\alpha_{cb} = 0.0133(Re_L)^{0.69}Pr_L^{0.4} \left(\frac{k_L}{\delta}\right) \quad (4)$$

که در آن ضریب  $k_L$  رسانندگی گرمایی فیلم مایع می باشد.

درستی این رابطه برای میرد ها

22, R - 134a, R - 502, R - 402, R - 404a

شده است. در روابط فوق برای بدست آوردن مقدار عدد رینولدز از

رابطه ی زیر استفاده می کنیم.

$$(Re_L)_{film} = \frac{4\dot{m}(1-x)\delta}{(1-\varepsilon)\mu_L} \quad (5)$$

در این روابط  $\dot{m}$  سرعت جرم کلی مایع و بخار،  $\varepsilon$  نسبت پوچی<sup>10</sup>

محلی،  $\delta$  ضخامت محلی لایه ی مایع،  $x$  بیانگر کیفیت محلی بخار و  $\mu_L$  هم ویسکوزیته ی دینامیکی سیال می باشد.

برای بدست آوردن نسبت پوچی از رابطه ی ارائه شده توسط

روهانی<sup>11</sup> [7] استفاده می شود. در این رابطه داریم:

$$\varepsilon = \left(\frac{x}{\rho_L}\right)\left\{[1 + 0.12(1-x)]\left(\frac{x}{\rho_G} + \frac{1-x}{\rho_L}\right) + \frac{1.18(1-x)[g\sigma(\rho_L - \rho_G)]^{0.25}}{\dot{m}^2\rho_L^{0.5}}\right\}^{-1} \quad (6)$$

که در این رابطه  $g$  بیانگر شتاب جاذبه و  $\sigma$  نیز کشش سطحی سیال

می باشد. برای محاسبه ی ضخامت سیال از سطح مقطع عرضی

سیال که توسط فاز مایع پوشیده شده استفاده می شود. بنا بر این با

فرض حضور ضخامت یکنواخت فیلم مایع در اطراف لوله و صرف نظر

از حضور فین داریم:

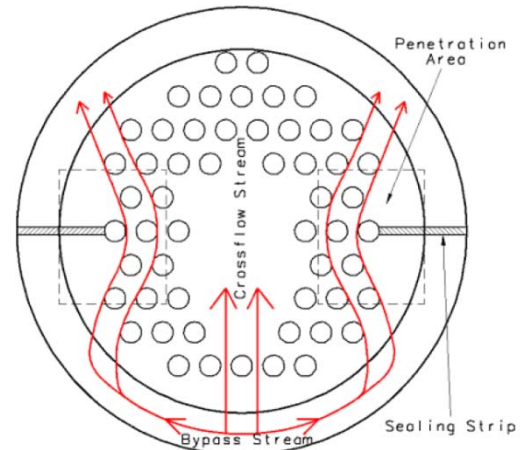
$$\delta = \frac{(1-\varepsilon)d_f}{4} \quad (7)$$

که در آن  $d_f$  بیانگر بیشترین قطر داخلی در پایه ی اتصال میکرو فین می باشد.

جریان C: جریان کنارگذر از فضای بین سطح بیرونی دسته لوله و دیواره داخلی پوسته. (شکل 2)

جریان E: جریان گذرنده از فضای بین سطح خارجی بافل و دیواره داخلی پوسته.

جریان F: جریان گذرنده از مسیر آزاد درون دسته لوله که بعلت حذف بعضی از لوله های درون دسته لوله جهت جایگذاری صفحات جداکننده در دو سر انتهایی مبدل ایجاد شده است.



شکل 2 - شماتیک کنارگذر دسته لوله (جریان C)

ضریب انتقال حرارت سمت پوسته در روش تبورک از رابطه زیر بدست می آید:

$$h_s = (J_C J_L J_B J_R J_S J_\mu) h_{Ideal} \quad (1)$$

که در این رابطه  $h_{Ideal}$  ضریب انتقال حرارت ایده آل،  $J_\mu$  ضریب تصحیح ویسکوزیته و مابقی ضرایب تصحیح اثر نشتی ها و کنارگذرها با تعاریف زیر می باشند:

$J_C$ : ضریب تصحیح پنجره بافل، از آنجا که سرعت جریان در پنجره بافل متفاوت با سرعت آن در سطح مقطع دسته لوله می باشد، جریان در این ناحیه غیرایده آل بوده و می بایست اثر آن بر انتقال حرارت لحاظ گردد.

$J_L$ : ضریب تصحیح نشت بافل، این ضریب اثر جریان های E و A در شکل 1 را بر ضریب انتقال حرارت منظور می کند.

$J_B$ : ضریب تصحیح کنارگذر دسته لوله، این ضریب جهت تصحیح اثر جریان های C و F در شکل 1 در نظر گرفته می شود.

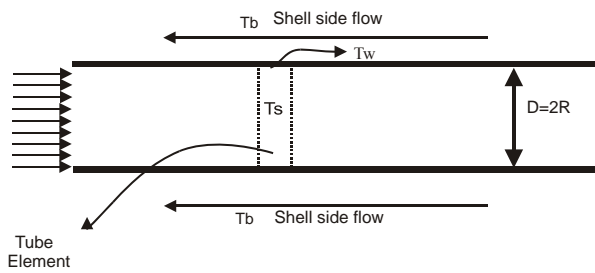
$J_S$ : ضریب تصحیح اثر فاصله نامساوی بین بافل ها، این ضریب در صورت بزرگ تر بودن فاصله بین بافل ها در ورود و خروج نسبت به بافل های میانی این اثر را تصحیح می کند.

$J_R$ : ضریب تصحیح جریان لایه ای، در جریان لایه ای ضریب انتقال حرارت کاهش پیدا میکند که این ضریب آن را در نظر میگیرد.

<sup>9</sup> Cooper

<sup>10</sup> Void fraction

<sup>11</sup> Ruhani



شکل (3) المان مورد بررسی در تحلیل حرارتی لوله ها

بر اساس روابط زیر می توان ضریب انتقال حرارت را در هر المان به صورت زیر نوشت. در این مقاله برای بدست آوردن این ضریب از روش بازگشت به عقب<sup>۱۴</sup> استفاده شده است.

$$(h_i)_n = f(q, x) \quad (11)$$

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{1}{h_o A_o} + \frac{R_{f_i}}{A_i} + \frac{R_{f_o}}{A_o} \quad (12)$$

$$dq = UA [T_b - T_s] \quad (13)$$

$$dx = \frac{dq}{\dot{M}_{refrigerant} \times h_{f_g}} \quad (14)$$

$$dT_b = \frac{dq}{\dot{M}_{coolant} \times C_{p_{coolant}}} \quad (15)$$

که در آن زیروند  $n$  بیانگر خواص در المان  $n$  ام می باشد. بدین ترتیب در هر المان پوسته در راستای لوله می توان افزایش دمای سیال داخل پوسته را محاسبه کرد. سپس بر روی داده های بدست آمده در شرایط مختلف تابعی فیت کرده و نتایج به دست آمده در تابعی به نام تابع دما قرار داده شده است. تابع دما ابتدا طول کل لوله را به عنوان ورودی گرفته و سپس بر روی این طول کل، نتایج بالا را اعمال می کند. بدین ترتیب در جریان حل مسئله با هر بار مراجعه به این تابع با توجه به محل المان مورد نظر و با توجه به طول لوله ی اولیه وارد شده، دمای پوسته را با تقریب بسیار مناسبی برای سیال اطراف لوله در آن المان به دست می دهد.

### روند کلی حل :

ابتدا یک طول اولیه برای لوله حدس زده می شود، بر اساس این طول اولیه یک توزیع دما توسط تابع دما برای جریان داخل پوسته بدست می آید. بر اساس این توزیع دما محاسبات انجام شده و طول مورد نیاز برای لوله بدست می آید. سپس این طول لوله با طول اولیه مقایسه شده و در صورت برابر نبودن این دو مقدار، به طول اولیه 5 درصد اضافه یا کم می شود و این مقدار برای طول اولیه جدید استفاده می شود. سپس توزیع دما را بر اساس این طول اولیه جدید محاسبه می شود. محاسبات تکرار می شود، و این محاسبات تا آنجا ادامه می یابد که طول اولیه حدس زده شده با طول محاسبه شده برابر شود در این حالت مسئله همگرا شده است و طول لوله ی مورد نیاز مشخص شده است.

با توجه به تغییرات دمای سطح لوله و وابستگی ضریب انتقال حرارت در سمت پوسته به دمای سطح، استفاده از روش LMTD

در رابطه ی (2) برای تاثیر حضور فین در لوله بر اساس پیشنهاد راویگوروراجان<sup>۱۲</sup> [8] استفاده شده است. این رابطه برای محاسبه ی افزایش ضریب انتقال حرارت به هنگام جوشش استفاده می شود.

$$E_{RB} = \left\{ 1 + \left[ 2.64 Re_{RB}^{0.036} Pr_L^{-0.024} \left( \frac{e_f}{d_f} \right)^{0.212} \left( \frac{p_f}{d_f} \right)^{-0.21} \left( \frac{\alpha_f}{90} \right)^{0.29} \right]^7 \right\}^{\frac{1}{7}} \quad (8)$$

که در این رابطه  $e_f$  بیانگر ارتفاع میکروفین،  $p_f$  گام محوری فین و  $\alpha$  نیز بیانگر زاویه ی مارپیچ فین می باشد.  $Re_{RB}$  که رینولدز آشفته ی فاز مایع نام دارد از رابطه ی زیر بدست می آید.

$$Re_{RB} = \frac{(1-x)\dot{m}d_f}{\mu_l} \quad (9)$$

علاوه بر در نظر گرفتن روابط بالا برای افزایش ضریب انتقال حرارت برای نشان دادن تاثیر حضور میکروفین بر اساس پیشنهاد گریگورینگ<sup>۱۳</sup> [9] از ضریب زیر نیز استفاده می شود.

$$E_{mf} = 1.89 \left( \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{ref}} \right)^2 - 3.7 \left( \frac{\dot{m}}{\dot{m}_{ref}} \right) + 3.02 \quad (10)$$

که در این رابطه  $\dot{m}_{ref}$  یک مقدار مرجع برای سرعت جرمی بوده و برای آن استفاده شده است که بتوان رابطه را بدون بعد در نظر گرفت. بر اساس پیشنهاد گریگورینگ مقدار  $\dot{m}_{ref}$  را برابر  $500 \text{ kg} \cdot \text{s} / \text{m}^2$  در نظر گرفته می شود.

از جمله موارد مهمی که در کد از آن استفاده شده و اشاره آن الزامی می نماید استفاده از تابعی برای محاسبه ی ویژگی های مبرد می باشد. با توجه به تغییرات دما در فاز بخار فوق گرم در راستای لوله و در نتیجه ی آن تغییرات خواص مبرد، ابتدا خواص حالت گازی مبرد را در درجات مختلف فوق گرم سنجیده و بعد از فیت کردن تابعی بر روی آنها، این خواص در قسمت های مختلف برنامه مورد استفاده قرار گرفته است. توابع خواص مبرد عبارتند از گرمای ویژه ی مخصوص، ویسکوزیته و ضریب رسانندگی گرمایی.

### شرح الگوریتم به کار گرفته شده:

از آنجا که میزان انتقال حرارت به دمای آب داخل پوسته وابستگی زیادی دارد بنا بر این به دست آوردن دمای داخل پوسته در هر فاصله از ابتدای ورودی، با تقریب خوبی، الزامی می نماید. برای این منظور ابتدا کد مورد نظر در حالتی که تنها یک پاس لوله وجود داشته باشد اجرا شده و بر اساس معادلات زیر می توان به توزیع دما در داخل پوسته دست یافت. از این توزیع دما در مراحل بعدی برای دمای داخل پوسته در حالتی که تعداد پاس ها بیشتر باشد استفاده می شود. برای به دست آوردن این توزیع دما طول لوله به المان هایی تقسیم شده و در این المان ها بررسی انتقال حرارت به صورت دیفرانسیلی صورت می پذیرد. در شکل زیر المانها ی لوله نشان داده شده است.

<sup>12</sup> Ravigururajan

<sup>13</sup> Grigoring

باشد با استفاده از رابطه ی راویگوروراجان و برگلس<sup>15</sup> [10] محاسبه می شود. این رابطه در زیر آمده است:

$$\frac{\alpha_{pt}}{\alpha_{pt}} = \left\{ 1 + \left[ 2.64 Re^{0.036} \left( \frac{e}{d_i} \right)^{0.212} \left( \frac{p}{d_i} \right)^{-0.21} \left( \frac{\beta}{90} \right)^{0.29} Pr^{-0.024} \right]^7 \right\}^{1/7} \quad (17)$$

که در این رابطه  $e$  بیانگر ارتفاع فین،  $p$  گام محوری از یک فین به فین بعدی،  $\beta$  زاویه ی مار پیچ فین نسبت به راستای لوله و مقدار  $\alpha_{pt}$  بیانگر ضریب انتقال حرارت برای لوله ی صاف و بدون فین می باشد. این ضریب براساس پیشنهاد گنیلینسکی<sup>16</sup> [11] از رابطه ی زیر محاسبه ی می شود.

$$Nu = \frac{\alpha_{pt} \times d_i}{k} \frac{\left( \frac{f}{2} \right) (Re - 1000) Pr}{1 + 12.7 \left( \frac{f}{2} \right)^{1/2} \left( Pr^{2/3} - 1 \right)} \left( \frac{\mu_{bulk}}{\mu_{wall}} \right)^{0.14} \quad (18)$$

که در این رابطه  $f$  ضریب اصطکاک است و برای به دست آوردن آوردن آن از تقریب پتخوف<sup>17</sup> استفاده می شود.

$$f = (1.58 \ln Re - 3.28)^{-2} \quad (19)$$

سپس برای به دست آوردن طول مورد نیاز باید اختلاف ضریب انتقال حرارت در کیفیت 85 درصد و ضریب انتقالی که از رابطه ی بالا به دست می آید، به صورت خطی بین طولی از لوله تقسیم شود. از آنجا که به دست آوردن این طول لوله به صورت مستقیم امکان پذیر نمی باشد، بنابراین در این مرحله از حل وارد حلقه ی تکرار دوم شده، بدین ترتیب که ابتدا طول این قسمت از لوله حدس زده شده و بر اساس این طول به تقسیم ضریب انتقال حرارت در المان های این طول پرداخته میشود در نهایت بعد از پیمودن این طول توسط برنامه در المان آخر کیفیت محاسبه شده، در صورتی که این کیفیت با 100 درصد مورد انتظار برابر نباشد، طول اولیه حدس زده شده به اندازه ی 5 درصد مورد تصحیح قرار می گیرد، محاسبات تا زمانی ادامه می یابد که طول حدس زده شده با طول محاسبه شده برابر شود در این حالت حلقه ی دوم نیز همگرا شده است و طول به دست آمده در این حلقه به طول اولیه محاسبه شده برای کیفیت 85 درصد اضافه می شود. بدین ترتیب در این مرحله طول مورد نیاز برای رسیدن به بخار اشباع خشک محاسبه شده است.

در نهایت به محاسبات در طول مافوق گرم پرداخته می شود. محاسبات در این حالت جریان بر اساس روابط راویگوروراجان و برگلس که در زمینه ی محاسبه ی ضریب انتقال حرارت در داخل لوله های فین دار معتبر ترین می باشند انجام شده است. بر اساس این روابط برای به دست آوردن ضریب انتقال حرارت از روابط (16-19) استفاده می شود.

در این قسمت محاسبات برای رسیدن به درجه ی مافوق گرم مورد نیاز پی گرفته شده و طول لوله ی مورد نیاز برای این منظور محاسبه می شود.

بدین ترتیب در انتهای این مرحله طول لوله ی کل محاسبه شده و این طول لوله با طول اولیه حدس زده شده مقایسه می شود و در

مناسب نمی باشد. اگرچه در بعضی از مقالات با در نظر گرفتن دمای میانگین برای سطح لوله محاسبات با این روش انجام می شود ولی دقت مناسبی ندارد.

در این مقاله با المان گیری از سطح لوله و محاسبه ی دمای لوله در هر المان تاثیر دمای لوله در محاسبات ضریب انتقال حرارت در سمت پوسته وارد شده است و به این ترتیب دقت محاسبات تا حدود زیادی افزایش می یابد.

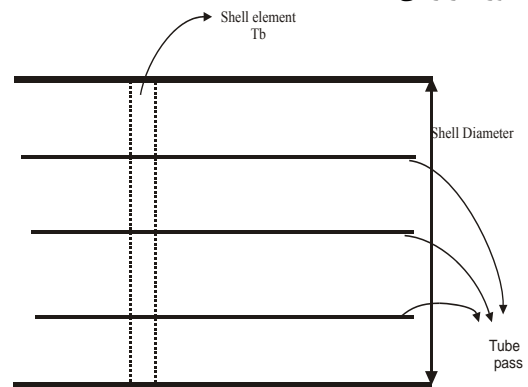
### شرح روش دیفرانسیلی:

ابتدا یک طول معین برای هر المان بر روی لوله مشخص می شود که اندازه ی این طول بیانگر میزان دقت حل می باشد. بدین ترتیب با حدس طول اولیه لوله تعداد المانهای کل به دست می آید. در معادلات مربوط به بدست آوردن ضریب انتقال حرارت داخل لوله در این روش داریم:

$$(h_i)_n = f(q, x, N_{pass}) \quad (16)$$

که در این رابطه  $N_{pass}$  شماره ی پاس مورد نظر است. با توجه به اینکه در هر پاس تعداد لوله ها می تواند متفاوت باشد در نتیجه ی آن جرم میرد و بنابراین عدد رینولدز و ضریب انتقال حرارت داخل لوله به شماره ی پاس مورد نظر بستگی دارد. بعد از محاسبه ی  $h_i$  از طریق رابطه (11) که در آن عدد رینولدز با توجه به شماره ی پاس محاسبه می شود، می توان از طریق روابط (14) مقدار افزایش کیفیت را در هر المان بدست آورد.

با توجه به اینکه در داخل پوسته تعداد زیادی بافل وجود دارد، می توان از گرادیان دما در راستای عرضی چشم پوشی کرد. بنابر این شکلی که برای المان های موجود در پوسته در نظر گرفته می شود به صورت زیر می باشد.



شکل (4) المان انتخاب شده برای پوسته

بدین ترتیب تا زمانی که کیفیت به 85 درصد برسد می توان از روش تام با استفاده از متد بالا استفاده کرد و با در دست داشتن تعداد المان های مورد نیاز برای رسیدن به این کیفیت طول مورد نیاز لوله را برای رسیدن به این کیفیت محاسبه کرد. برای محاسبه ی ضریب انتقال حرارت و در نتیجه ی آن طول مورد نیاز از کیفیت 85 درصد تا رسیدن به بخار اشباع خشک بر اساس پیشنهاد تام ابتدا ضریب انتقال حرارت در حالتی که بخار اشباع خشک در همان دما موجود

<sup>15</sup> Ravigururajan and Bergles

<sup>16</sup> Gnielinski

<sup>17</sup> Petukhov

جدول (1) مقایسه ی خروجی برنامه با اطلاعات طول لوله ی کاتالوگ

سایز اوپراتور (ton)	طول لوله موجود (m)	طول لوله محاسبه شده (m)	درصد خطا
120	8.45	8.14	3.67
70	8.45	8.02	5.08

از آنجا که این در برنامه تمامی ویژگیهای اوپراتور قابل تغییر می باشد، می توان با در نظر گرفتن شرایط حاکم طراحی مورد نیاز را انجام داد و با تغییر پارامترهای موجود در اوپراتور مانند نوع میرد، ویژگی های پوسته از جمله قطر پوسته تعداد مدار<sup>20</sup> پوسته، تعداد بافل، فاصله ی بافل ها، درصد بریدگی بافل ها<sup>21</sup>، جنس بافل ها و همچنین ویژگی های لوله ها مانند قطر لوله، تعداد پاس، تعداد لوله در هر پاس، فین دار یا بدون فین بودن لوله ها، دانسیته ی فین و نیز جنس لوله ها را تغییر داد و با استفاده از این برنامه طول مورد نیاز لوله را برای تناژ دلخواه تبرید به دست آورد. هم چنین با تغییر این شرایط می توان به بهینه سازی توسط این برنامه نیز پرداخت و باتغییر پارامتر خاصی مقدار بهینه را برای آن به دست آورد. برای نمونه ی محاسبات توسط این برنامه، اوپراتور 120 و 70 تن را با به کار گرفتن  $R - 134a$  به جای  $R - 22$  آزمایش شده و نتایج حاصل در جدول زیر فراهم شده است. بر اساس نتایج به دست آمده استفاده از  $R - 134a$  به جای  $R - 22$  باعث افزایش طول لوله به اندازه ی 12 درصد خواهد شد.

جدول (2) مقایسه ی طول لوله ی مورد نیاز در صورت استفاده از  $R_{134a}$

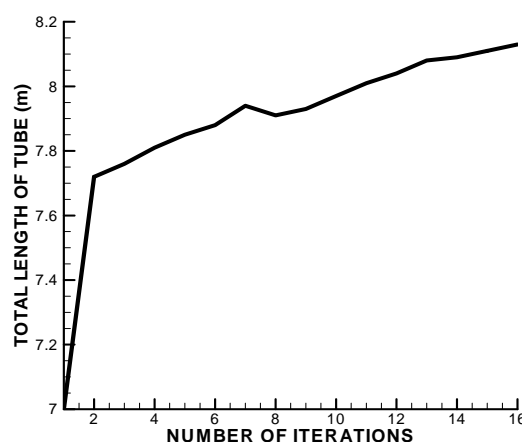
سایز اوپراتور	طول لوله با میرد $R - 22$	طول لوله با میرد $R - 134a$	درصد لوله ی افزایش یافته
120	8.14	9.19	12.9
70	8.02	8.79	9.6

در این برنامه هم چنین بعد از محاسبه ی طول کل لوله ی مورد نیاز، طول لوله ای را که در هر فاز مورد نیاز است به صورت خروجی ارائه می دهد. بدین ترتیب می توان در طول خاصی از لوله، مثلاً طول بخار فوق گرم (با توجه به کم بودن ضریب انتقال حرارت در طولی از لوله که در آن بخار فوق گرم جریان دارد)، تمهیدات لازم برای افزایش ضریب انتقال حرارت در داخل لوله در آن طول اتخاذ شود. در جدول زیر نمونه ی محاسبات طول تفکیک شده در فاز های مختلف برای 4 نوع اوپراتور نمایش داده شده است.

صورت وجود اختلاف محاسبات با طول اولیه ی جدید پی گرفته می شود.

### نتایج:

با اجراکردن برنامه ی طراحی اوپراتور، پس از وارد کردن شرایط مورد نیاز طراحی، طول لوله ی مورد نیاز برای آن طراحی در اختیار کاربر قرا می گیرد. در شکل زیر روند همگرایی مسئله ی طراحی یک اوپراتور 120 تن تبرید با میرد  $R22$  نشان داده شده است که در آن بر اساس اطلاعات موجود ضریب گرفتگی در داخل و خارج به ترتیب برابر  $0.000022 \frac{m^2.K}{w}$  و  $0.000003 \frac{m^2.K}{w}$  در نظر گرفته شده است. در این شکل طول کل لوله مورد استفاده بر حسب متر بوده و با انجام تکرار<sup>18</sup> مسئله به طول نهایی همگرا می شود.



شکل (5) روند همگرایی طراحی طول اوپراتور 120 تن با میرد  $R_{22}$

برای صحت گذاری بر درستی برنامه و مقایسه ی طول لوله ی به دست آمده با مقادیر عملی، نتایج به دست آمده از این برنامه با کاتالوگ اوپراتوری با مشخصاتی کاملاً یکسان طراحی شده توسط کریر<sup>19</sup> مقایسه شده و نتایج آن در جدول زیر آورده شده است. همانطور که در این جدول مشاهده می شود طول لوله ی محاسبه شده با دقت بسیار مناسبی با نمونه ی کریر هم خوانی دارد. در جدول زیر علاوه بر نمونه ی 120 تن تبرید برای اطمینان از نتایج به دست آمده از برنامه اطلاعات جدیدی را برای نمونه ی اوپراتور کاملاً یکسان با طراحی کریر برای 70 تن تبرید نیز آورده شده است. با مقایسه ی این نتایج محاسبات انجام گرفته در برنامه صحت گذاری خواهد شد.

<sup>20</sup> circuit  
<sup>21</sup> Baffle cut

<sup>18</sup> Iteration  
<sup>19</sup> Carrier

جدول (3) طول لوله ی مورد نیاز در فازهای مختلف جریان داخل لوله

سایز اوپراتور (ton)	نوع مبرد	طول لوله در فاز مورد نظر (m)		
		15%	85%	5 درجه مافوق گرم
		85%	100%	
120	R_22	6.2	0.59	1.35
120	R_134a	6.89	0.73	1.57
70	R_22	5.86	0.76	1.4
70	R_134a	6.44	0.84	1.51

آشفته در داخل لوله بدون

$\alpha_f$	$\frac{w}{m^2.K}$	فین
$\alpha_{mf}$	$\frac{w}{m^2.K}$	زاویه ی ماریچ فین
$\alpha_{nb}$	$\frac{w}{m^2.K}$	ضریب انتقال حرارت در لوله
$\beta$	$\frac{w}{m^2.K}$	های دارای میکرو فین
$\delta$	$\frac{w}{m^2.K}$	ضریب انتقال حرارت به روش
$\varepsilon$	$\frac{w}{m^2.K}$	جوشش استخری
$\mu$	$\frac{w}{m^2.K}$	زاویه ی ماریچ فین
$\rho$	$\frac{w}{m^2.K}$	ضخامت محلی لایه ی مایع
$\sigma$	$\frac{w}{m^2.K}$	نسبت پوچی
	$pa.s$	ویسکوزیته دینامیکی
	$\frac{Kg}{m^3}$	چگالی
	$\frac{N}{m}$	کشش سطحی

مراجع:

- [1]-**Taborek, J. (1983)**. Shell-and-Tube Heat Exchangers: Single-Phase Flow, *Heat Exchanger Design Handbook*, Chapter 3.3, Hemisphere, New York.
- [2]-**Tinker, T. (1951)**. Shell Side Characteristics of Shell and Tube Heat Exchangers, *General Discussion on Heat Transfer*, Institution of Mechanical Engineers, London, pp. 97-116.
- [3]-**Bell, K.J. (1960)**. Exchangers Design Based on the Delaware Research Program, *Petroleum Engineering*, Vol. 32, No. 11, pp. C26-36 and C40a-C40c.
- [4]-**Thome, J.R., Kattan, N. and Favrat, D. (1997)**. Evaporation in Microfin Tubes: a Generalized Prediction Model, Convective Flow and Pool Boiling Conference, Irsee, Germany, May 18-23, Paper VII-4.
- [5]-**Cooper, M.K. (1984a)**. Saturated Nucleate Pool Boiling: A Simple Correlation, 1st U.K. National Heat Transfer Conference, Vol. 2, pp. 785-793.
- [6]-**Thome, J.R. (1998)**. Condensation, Boiling and Evaporation of Fluorocarbon and Other Refrigerants: A State-of-the-Art Review, ARI Technical Report, Air-Conditioning and Refrigeration Institute, Arlington, VA 22203-1627
- [7]-**Rouhani, Z. and Axelsson, E. (1970)**. Calculation of Volume Void Fraction in the Subcooled and Quality Region, *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 13, pp. 383-393.
- [8]- **Ravigururajan, T.S. and Bergles, A.E. (1985)**. General Correlations for Pressure Drop and Heat Transfer for Single-Phase Turbulent Flow in Internally Ribbed Tubes, *Augmentation of Heat Transfer in Energy Systems*, ASME HTD Vol. 52, pp. 9-20.
- [9]-**Gregorig, R. (1954)**. Film Condensation on Finely Rippled Surface with Consideration of Surface Tension, *Z. Agnew. Math. Phys.*, Vol. 5, pp. 36-49.

### فهرست علائم

$A$	$m^2$	مساحت
$C_p$	$\frac{Kj}{Kg.K}$	ظرفیت گرمایی ویژه
$d$	$m$	قطر لوله
$e_f$	$m$	ارتفاع میکروفین
$E_{mf}$		ضریب تاثیر حضور میکروفین در انتقال حرارت لوله
$E_{RB}$		ضریب تاثیر افزایش انتقال حرارت به هنگام جوشش ناشی از حضور فین
$f$		ضریب اصطکاک
$g$	$\frac{m}{s^2}$	شتاب گرانش
$h_{fg}$	$\frac{Kj}{Kg}$	آنتالپی تبخیر
$h_i$		ضریب انتقال حرارت در داخل لوله
$h_s$	$\frac{w}{m^2.K}$	ضریب انتقال حرارت در سمت پوسته
$k$	$\frac{w}{m^2.K}$	ضریب رسانندگی
$M$	$\frac{m.K}{Kg}$	جرم مولکولی
$\dot{m}$	$\frac{Kg.s}{m^2}$	سرعت جرم
$\dot{M}$	$\frac{Kg}{s}$	آهنگ عبو جرم
$p_f$	$m$	گام محوری فین
$Pr$		عدد پرانتل
$P_r$		فشار کاهیده شده
$q$	$\frac{w}{m^2}$	شار گرمای محلی
$Re$		عدد رینولدز
$R_f$	$\frac{m^2.K}{w}$	ضریب گرفتگی
$T$	$K$	دما
$x$		کیفیت محلی بخار
$U$	$\frac{w}{m^2.K}$	ضریب انتقال حرارت کلی
		<b>علائم یونانی:</b>
$\alpha_{cb}$		ضریب انتقال حرارت در جریان

**[10]-Ravigururajan, T.S. and Bergles, A.E. (1985).** General Correlations for Pressure Drop and Heat Transfer for Single-Phase Turbulent Flow in Internally Ribbed Tubes, *Augmentation of Heat Transfer in Energy Systems*, ASME HTD Vol. 52, pp. 9-20.

**[11]-Gnielinski, V. (1976).** *Int. Chem. Eng.*, Vol. 6, pp. 359-368.