



# الگوریتم طراحی سریع در مبدل‌های گرمایی پوسته و لوله

## Rapid Design Algorithm of Shell and Tube Heat Exchangers

● مهندس امیر حسین صبوری شیرازی  
کارشناس ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی

گرمای سمت لوله از روابط مربوطه در لوله‌ها استفاده شده و برای محاسبه افت فشار و ضریب انتقال گرمای سمت پوسته، از روابط مربوطه در روش کرن آ، روش بل-دلور آ و مدل کنارگذر-نشتی ساده استفاده شده است. از مزایای این روش می‌توان به دست آمدن مبدل گرمایی با سطح بهینه و نداشتن حلقه‌های تکرار عملیات همچون دیگر روش‌ها اشاره کرد.

### چکیده

در این مقاله به معرفی روش الگوریتم طراحی سریع در مبدل‌های گرمایی به ویژه مبدل‌های گرمایی پوسته و لوله پرداخته می‌شود. مبنای این روش بر این اساس است که افت فشار سمت لوله و سمت پوسته مبدل گرمایی به ترتیب برابر با مقادیر مجازشان خواهد شد. برای محاسبه افت فشار و ضریب انتقال



#### ۱- مقدمه

پلی<sup>۶</sup> و همکارانش در سال ۱۹۹۱، روش الگوریتم طراحی سریع را برای اندازه‌گذاری<sup>۷</sup> مبدل‌های گرمایی پوسته و لوله و مبدل‌های گرمایی فشرده معرفی کردند. این الگوریتم‌ها ممکن است همراه با روش‌های ارزیابی جزء به جزء همچون روش کرن و بل-دلور برای طراحی مکانیکی و آنالیز ارتعاشات دسته لوله، و برای به دست آوردن یک طراحی بهینه استفاده گردد. فلسفه این روش، استفاده کامل از حداکثر افت فشار مجاز در دو طرف جریان سرد و گرم می‌باشد. زیرا استفاده کامل از افت فشارها تضمین کننده این موضوع است که مبدل گرمایی برای بالاترین سرعت‌های ممکن (و همچنین

از دو روش کرن و بل-دلور برای ارزیابی<sup>۵</sup> مبدل‌های گرمایی پوسته و لوله استفاده می‌گردد. در این دو روش، هندسه مبدل گرمایی تقریباً به طور کامل توسط طراح معین می‌گردد. همچنین در ارزیابی مبدل گرمایی از محاسبات متوالی انتقال گرما و افت فشار در سمت لوله و سمت پوسته استفاده می‌شود. با محاسبات تکراری، در نهایت مبدل گرمایی قبول می‌گردد که ضریب کششی و محدودیت افت فشار را، بدون بررسی کلی بر روی دیگر حالات ممکن که در برخی مواقع مناسب‌تر هستند، ارضاء نماید.



$$\Delta P_t = K_t A h_t^{3.5} \quad (1)$$

بالاترین ضرایب انتقال گرمای ممکن) طراحی شده است. بنابراین کوچک‌ترین مبدل گرمایی ممکن برای بار گرمایی مورد نظر است که به علت کوچکی، می‌تواند اقتصادی‌ترین مبدل گرمایی باشد.

که در آن (۲)

$$K_t = 1 / (0.023)^{2.5} D^{1/2} \mu_t^{11/6} / (M_t \rho_t k_t^{7/3} C_{pt}^{7/6}) (D / D_t) [(\mu_t / \mu_w)^{-0.14}]^{4.5}$$

نکته قابل ذکر این است که  $K_t$ ، وابسته به قطر لوله، خصوصیات فیزیکی و نرخ جریان سیال سمت لوله دارد.

برای این منظور، بسیار مهم است که روابطی ساده بین افت فشار و ضریب انتقال گرما با در نظر گرفتن حداقل پارامترهای هندسی برای مبدل گرمایی وجود داشته باشد (پیترز و تیمرهوس<sup>۸</sup> ۱۹۸۱، پلی و همکارانش ۱۹۹۱). در این مقاله از چنین معادلاتی برای جریان مغشوش در روش الگوریتم طراحی سریع استفاده شده است.

### ۳- ارتباط بین افت فشار و ضریب انتقال گرمای سمت پوسته: روش کرن

برای به دست آوردن رابطه بین افت فشار و ضریب انتقال گرمای سمت پوسته به این صورت عمل می‌گردد که افت فشار سمت پوسته را همانند قبل به صورت تابعی از سطح مبدل گرمایی و ضریب انتقال گرمای سمت پوسته به دست می‌آورند.

### ۲- ارتباط بین افت فشار و ضریب انتقال گرمای سمت لوله

برای به دست آوردن رابطه بین افت فشار و ضریب انتقال گرمای سمت لوله به این صورت عمل می‌گردد که افت فشار سمت لوله را به صورت تابعی از سطح مبدل گرمایی و ضریب انتقال گرمای سمت لوله به دست می‌آورند.



که در آن (۸)  $\Delta P_s = K_{s1} A h_s^{5.1}$  (۳)

$$K_{s1} = [(1 + 0.3N_{tcw}) \rho_s R_l + 2f_l \rho_s N_{tc} (\mu_s / \mu_{sw})^{-0.14} R_l R_b] / (\pi D_l N_l L_{bc} NS) [j_h k_s \rho_s / \mu_s (C_{ps} \mu_s / k_s)^{1/3} (\mu_s / \mu_{sw})^{0.14} j_c j_b j_r j_s]^{-2}$$

$$K_{s2} = [2f_l \rho_s N_{tc} (\mu_s / \mu_{sw})^{-0.14} (1 + N_{tcw} / N_{tc}) R_b R_l - (1 + 0.3N_{tcw}) \rho_s R_l - 4f_l \rho_s N_{tc} (\mu_s / \mu_{sw})^{-0.14} R_l R_b] [j_h k_s \rho_s / \mu_s (C_{ps} \mu_s / k_s)^{1/3} (\mu_s / \mu_{sw})^{0.14} j_c j_b j_r j_s]^{-2}$$
 (۹)

توجه گردد که  $K_{s1}$  و  $K_{s2}$  وابسته به حالتی بسیار پیچیده در ضریب انتقال گرمای ایده آل ( $j_h$ )، ضریب اصطکاک ایده آل ( $f_l$ )، ضرایب تصحیح ( $j_c, j_b, j_r, j_s$ )،  $j_f, j_s, j_b, j_r, j_c$ ، هندسه ( $R_s, R_b, R_l, j_s, j_b, j_r, j_c$ ) و ( $NS, L_{bc}, N_l, D_l, N_{tc}, N_{tcw}$ ) و خصوصیات فیزیکی سیال هستند. علاوه بر این، بفل ها باید در فاصله یکسان از یکدیگر قرار بگیرند و برش بفل باید به صورتی انتخاب گردد که نسبت سطح جریان عرضی به سطح پنجره برابر واحد گردد. این حالت می تواند گزینه مناسبی برای استفاده از افت فشار برای غلبه بر اصطکاک و بهبود انتقال گرما باشد (پلی و همکارانش ۱۹۹۱).

برای بیشتر کاربردهای عملی در بهینه سازی مبدل گرمایی و سنتز شبکه، معادله (۷) بسیار پیچیده می باشد، در حالی که معادله (۳) به اندازه کافی دقیق نمی باشد. داشتن یک رابطه ساده برای سمت پوسته همانند رابطه (۳) که اثرات کنار گذری و نشستی جریان را در پوسته به حساب آورد، مطلوب می باشد. پلی و همکارانش در سال ۱۹۹۱، برای مبدل های گرمایی با هندسه

که در آن (۴)  $K_s = 67 L_{tp} (L_{tp} - D_t) D_e^{1.1} \mu_s^{1.3} / (D_t M_s \rho_s k_s^{3.4} C_{ps}^{1.7}) [(\mu_s / \mu_{sw})^{-0.14}]^{6.1}$

نکته قابل ذکر این است که  $K_s$ ، وابسته به قطر معادل دسته لوله، خصوصیات فیزیکی و نرخ جریان سیال سمت پوسته دارد. قطر معادل را برای آرایش های متفاوت گام لوله از معادله (۵) به دست می آید.

for triangular pitch (۵)  $D_e = 4[\sqrt{3}/4 L_{tp}^2 - \pi/8 D_t^2] / (\pi/2 D_t)$

for square pitch (۶)  $D_e = 4[L_{tp}^2 - \pi/4 D_t^2] / (\pi D_t)$

۴-ارتباط بین افت فشار و ضریب انتقال گرمای سمت پوسته به روش بل-دلور:  
روش بل-دلور همانند روش کرن، برای به دست آوردن رابطه بین افت فشار و ضریب انتقال گرمای سمت پوسته به این صورت عمل می گردد که افت فشار سمت پوسته را صورت تابعی از سطح مبدل گرمایی و ضریب انتقال گرمای سمت پوسته به دست می آورند. رابطه ارائه شده توسط پنجه شاهی<sup>۹</sup> در سال ۱۹۹۱ به صورت زیر می باشد.

$$\Delta P_s = (K_{s1} A + K_{s2}) h_s^2$$
 (۷)





(۱۷) مشابه که دارای سطح جریانی برابر با سطح پنجره بفل باشد، رابطه شماره ده را پیشنهاد کردند.

$$LMTD = [(T_{ho} - T_{ci}) - (T_{hi} - T_{co})] / \ln[(T_{ho} - T_{ci}) / (T_{hi} - T_{co})]$$

اما برای محاسبه ضریب تصحیح دما باید پارامترهای زیر را تعریف کرد و سپس ضریب تصحیح دما را به دست آورد.

$$P = (T_{co} - T_{ci}) / (T_{hi} - T_{ci}) \quad (۱۸)$$

$$R = (T_{hi} - T_{ho}) / (T_{co} - T_{ci}) \quad (۱۹)$$

(۲۰)

$$P^* = \{[(1-PR)/(1-P)]^{1/NS} - 1\} / \{[(1-PR)/(1-P)]^{1/NS} - R\} \quad \text{for } R \neq 1$$

$$P^* = P / [P - NS(1-P)] \quad \text{for } R = 1 \quad (۲۱)$$

$$F = \sqrt{1+R^2} \ln\{(1-P^*R)/(1-P^*)\} / \quad \text{for } R \neq 1 \quad (۲۲)$$

$$[(1-R) \ln\{(2-P^*(1+R-\sqrt{1+R^2})) / (2-P^*(1+R+\sqrt{1+R^2}))\}] \quad (۲۳)$$

$$F = \sqrt{2} P^* / [(1-P^*) \ln\{(2-P^*(2-\sqrt{2})) / (2-P^*(2+\sqrt{2}))\}] \quad \text{for } R = 1$$

یکی از روش های حل یک دستگاه سه معادله و سه مجهول غیرخطی این است که ابتدا سه معادله را با یکدیگر ترکیب کرده و یک معادله غیرخطی بر اساس یک مجهول به دست آورد. معادله غیرخطی استخراجی با مجهول سطح با استفاده از روش کرن از دستگاه سه معادله و سه مجهول غیرخطی عبارت است از:

$$k_1 A^{1/5.1} + k_2 A^{1/3.5} + k_3 A + k_4 = 0 \quad (۲۴)$$

که در آن (۲۵)

$$k_1 = (K_s / \Delta P_s)^{1/5.1}$$

$$k_2 = (K_t / \Delta P_t)^{1/3.5} (D_t / D)$$

$$k_3 = -F(LMTD) / Q$$

$$k_4 = R_{ds} + R_{dt} (D_t / D) + D_t / (2k_w) \ln(D_t / D)$$

معادله غیرخطی استخراج شده با استفاده از روش بل-دلور از دستگاه سه معادله و سه مجهول غیرخطی عبارت است از:

$$k_1 A^2 + k_2 A^{9/7} + k_3 A + k_4 A^{4/7} + k_5 A^{2/7} + k_6 = 0 \quad (۲۶)$$

که در آن (۲۷)

$$k_1 = [F(LMTD) / Q]^2$$

$$k_2 = -2F(LMTD) / Q (D_t / D) (K_t / \Delta P_t)^{2/7}$$

$$k_3 = -2F(LMTD) / Q [R_{ds} + R_{dt} (D_t / D) + D_t / (2k_w) \ln(D_t / D)] - (K_{s1} / \Delta P_s)$$

$$k_4 = (D_t / D)^2 (K_t / \Delta P_t)^{4/7}$$

$$k_5 = 2(D_t / D) (K_t / \Delta P_t)^{2/7} [R_{ds} + R_{dt} (D_t / D) + D_t / (2k_w) \ln(D_t / D)]$$

$$k_6 = [R_{ds} + R_{dt} (D_t / D) + D_t / (2k_w) \ln(D_t / D)]^2 - (K_{s2} / \Delta P_s)$$

معادله غیر خطی استخراج شده با استفاده از مدل کنارگذر نشستی ساده از

$$\Delta P_s = K_s' A h_s^{4.412} \quad (۱۰)$$

اگر چه عبارت  $K_s'$  به سادگی در دسترس نمی باشد، ولی بر اساس قوانین سر انگشتی ساده استخراج می گردد: ترکیب اثرات تمامی ضرایب تصحیح برای یک طراحی مناسب معقول معمولاً در حدود ۶۰٪ می باشد و ممکن است که در آن ضریب اطمینان هم در نظر گرفته شود.

### ۵- ارتباط بین افت فشار و ضریب انتقال گرمای سمت پوسته: مدل کنارگذر-نشستی ساده

با توجه به مدل ارائه شده و روابط افت فشار و انتقال گرمای سمت پوسته توسط پیترز و تیمرئوس در سال ۱۹۸۱، افت فشار سمت پوسته را همانند قبل به صورت تابعی از سطح مبدل گرمایی و ضریب انتقال گرمای سمت پوسته می توان به دست آورد.

(۱۱)

$$\Delta P_s = K_{ss} A h_s^{4.75}$$

که در آن (۱۲)

$$K_{ss} = 2b_0 / [\pi(a_0 / F_s)^{19/4}] (N_r N_c / N_t) (L_{pp} - D_t) D_t^{3/4} \mu_s^{17/12} / (M_s \rho_s^{19/6} C_{ps}^{19/12})$$

که در آن  $(N_r N_c / N_t) = 1$  و  $[2b_0 / [\pi(a_0 / F_s)^{19/4}]]$  برای دو آرایش لوله به صورت زیر محاسبه می گردد.

for in-line tubes (۱۳)

$$3567.2 [0.044 + 0.08(L_{pp} / D) / (L_{pn} / D_t - 1)]^{0.43+1.13D_t / L_{pp}}$$

for staggered tubes (۱۴)

$$1149.5 [0.23 + 0.11 / (L_{pn} / D_t - 1)]^{1.08}$$

توجه گردد که  $K_{ss}$  تنها به خصوصیات فیزیکی و نرخ جریان سیال سمت پوسته (در طول قطر و گام لوله ها) بستگی دارد.

### ۶- معادلات طراحی سریع

یک دستگاه سه معادله  $(\Delta P_s, \Delta P_t, Q)$  و سه مجهول  $(h_s, h_t, A)$  با کمک گرفتن از معادله پایه طراحی مبدل گرمایی (معادله (۱۵)) قابل تشکیل می باشد.

$$Q = UAF(LMTD) = M_c C_{pc} (T_{co} - T_{ci}) = M_h C_{ph} (T_{hi} - T_{ho}) \quad (۱۵)$$

که در آن (۱۶)

$$U = [(1/h_s) + R_{ds} + (1/h_t + R_{dt})(D_t / D) + D_t / (2k_w) \ln(D_t / D)]^{-1}$$



دستگاه سه معادله و سه مجهول غیرخطی عبارت است از:

$$k_1 A^{1/4.75} + k_2 A^{1/3.5} + k_3 A + k_4 = 0 \quad (28)$$

با حل کردن یکی از معادلات (۲۴)، (۲۶) و (۲۸)، و به دست آمدن سطح مبدل گرمایی، می توان مقدار سطح را در معادلات  $\Delta P_s$  و  $\Delta P_t$  دستگاه مربوطه قرار داد و به ترتیب مقادیر  $h_s$  و  $h_t$  را به دست آورد. سطح مبدل گرمایی که از حل معادلات (۲۴)، (۲۶) یا (۲۸) حاصل گشته، سطح بهینه مبدل گرمایی در هر یک از روش های فوق می باشد.

که در آن (۲۹)

$$k_1 = (K_{ss} / \Delta P_s)^{1/4.75}$$

$$k_2 = (K_t / \Delta P_t)^{1/3.5} (D_t / D)$$

$$k_3 = -F(LMTD) / Q$$

$$k_4 = R_{ds} + R_{dt} (D_t / D) + D_t / (2k_w) \ln(D_t / D)$$

با داشتن سطح مبدل گرمایی و ضرایب انتقال گرما در سمت لوله و پوسته می توان مشخصات هندسی مبدل گرمایی را با استفاده از معادلات مربوطه موجود در هر روش تعیین کرد. در مثال زیر با استفاده از الگوریتم طراحی سریع روش کرن یک مبدل گرمایی پوسته و لوله طراحی شد است.

برای حل معادلات غیرخطی (معادلات (۲۴)، (۲۶) و (۲۸)) از روش های عددی حل معادلات می توان کمک گرفت. در پیوست روش حل نیوتون-رافسون برای حل معادله غیرخطی توضیح داده شده است.





### ۷- مطالعه موردی

و آرایش مربعی برای لوله‌ها در نظر گرفته شده است. همچنین از مقاومت دیواره فلزی و ضریب تصحیح ویسکوزیته برای سادگی محاسبات چشم پوشی شده است. مراحل حل به صورت گام به گام در زیر آورده شده است.

یک مبدل گرمایی پوسته و لوله با ۱ پوسته و ۶ گذر لوله با الگوریتم طراحی سریع روش کرن با داده‌های زیر طراحی کنید.

#### ۷-۱- محاسبه سطح انتقال گرما

با توجه به معادله (۱۵) مقدار  $M_t$  به صورت زیر محاسبه می‌گردد:  
 $M_t = [53650/3600 \times 2684(98-65)]/[4180(25-15)] = 31.58 \text{ kg/s}$

**حل:** در این مثال تعداد گذر پوسته و لوله مشخص شده است. در حالت کلی در صورت مشخص نبودن آن، باید از معیار ضریب تصحیح دما تعداد گذرها مشخص گردد. در این مثال  $L_p = 0.0254 \text{ m}$  ,  $D = 0.0154 \text{ m}$  ,  $D_i = 0.0191 \text{ m}$

با توجه به معادله (۲) مقدار  $K_t$  به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

Process Data	Physical Properties Data	
$T_{hi} = 98 \text{ }^\circ\text{C}$	$C_{ph} = C_{ps} = 2684 \text{ J/(kg}^\circ\text{C)}$	$k_h = k_s = 0.11 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$
$T_{ci} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$	$C_{pc} = C_{pt} = 4180 \text{ J/(kg}^\circ\text{C)}$	$k_c = k_t = 0.60 \text{ W/(m}^\circ\text{C)}$
$T_{ho} = 65 \text{ }^\circ\text{C}$	$\rho_h = \rho_s = 777 \text{ kg/m}^3$	$R_{ds} = 0.15 \times 10^{-3} \text{ m}^2\text{ }^\circ\text{C/W}$
$T_{co} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	$\rho_c = \rho_t = 998 \text{ kg/m}^3$	$R_{dt} = 0.15 \times 10^{-3} \text{ m}^2\text{ }^\circ\text{C/W}$
$M_h = M_s = 53650 \text{ kg/hr}$	$\mu_h = \mu_s = 0.23 \times 10^{-3} \text{ kg/(m.s)}$	$\Delta P_s = 7 \text{ kPa}$
$M_c = M_t$	$\mu_c = \mu_t = 1.00 \times 10^{-3} \text{ kg/(m.s)}$	$\Delta P_t = 42 \text{ kPa}$

جدول (۱): داده‌های فرایندی و خصوصیات فیزیکی



معادله غیرخطی به دست آمده زیر (جای گذاری ضرایب در معادله (۲۴)) با روش نیوتن-رافسون قابل حل می باشد.

$$4.2 \times 10^{-4} A^{1/5.1} + 5.5 \times 10^{-5} A^{1/3.5} - 4.5 \times 10^{-5} A + 3.4 \times 10^{-4} = 0$$

پاسخ معادله فوق عبارت است از:

$$A = 28.4 \text{ m}^2$$

#### ۲-۷- محاسبه ضرایب انتقال گرما و سرعت ها

با کمک معادله (۱) و (۳) به ترتیب می توان  $h_t$  و  $h_s$  را محاسبه نمود.

$$h_t = [42000 / (2.46 \times 10^{-11} \times 28.4)]^{1/3.5} = 8649.5 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

$$h_s = [7000 / (3.93 \times 10^{-14} \times 28.4)]^{1/5.1} = 1235.8 \text{ W/m}^2\text{°C}$$

برای محاسبه  $V_t$  می توان از رابطه ناسلت ( $Nu_t = h_t D_e / k_f$ ) رژیم جریان مغشوش سیال غیریوسکوز که شامل عدد رینولدز ( $Re_t = \rho_t v_t D_e / \mu_t$ ) و پرانتل ( $Pr_t = C_{pt} \mu_t / k_f$ ) می باشد، استفاده کرد.

$$Nu_t = 0.023 Re_t^{0.8} Pr_t^{1/3} (\mu_t / \mu_{tw})^{0.14} \quad (30)$$

سرعت سیال درون لوله عبارت است از:

$$v_t = [0.001 / (0.0154 \times 998)] [8649.5 \times 0.0154 / 0.6 / 0.023 / (6.97)^{1/3}]^{0.8} = 2.77 \text{ m/s}$$

برای محاسبه  $V_s$  می توان از رابطه ناسلت ( $Nu_s = h_s D_e / k_s$ ) رژیم جریان مغشوش سیال غیریوسکوز روش کرن که شامل عدد رینولدز ( $Re_s = \rho_s v_s D_e / \mu_s$ ) و پرانتل ( $Pr_s = C_{ps} \mu_s / k_s$ ) می باشد استفاده کرد.

$$Nu_s = 0.36 Re_s^{0.55} Pr_s^{1/3} (\mu_s / \mu_{sw})^{0.14} \quad (31)$$

سرعت سیال درون پوسته عبارت است از:

$$v_s = [0.00023 / (0.0239 \times 777)] [1235.8 \times 0.0239 / 0.11 / 0.36 / (5.61)^{1/3}]^{0.55} = 0.73 \text{ m/s}$$

$$K_t = 1 / (0.023)^{2.5} (0.0154)^{1/2} (0.001)^{11/6} / (31.58 \times 998 \times 0.6^{7/3} \times 4180^{7/6}) (15.4 / 19.1) = 2.46 \times 10^{-11}$$

برای محاسبه  $K_s$  از معادله (۴)، ابتدا باید قطر معادل را معادله (۶) حساب نمود.

$$D_e = 4 [0.0254^2 - \pi / 4 \times 0.0191^2] / (\pi \times 0.0191) = 0.0239 \text{ m}$$

$$K_s = 67 (0.0254) (0.0254 - 0.0191) (0.0239)^{1.4} (0.00023)^{1.3} / (0.0191 \times 14.9 \times 777 \times 0.11^{3.4} \times 2684^{1.7}) = 3.93 \times 10^{-14}$$

برای محاسبه ضرایب معادله غیرخطی با کمک معادلات (۲۵)، ابتدا باید

ضریب تصحیح دما (معادلات (۱۸) تا (۲۳))، میانگین دمای لگاریتمی (معادله (۱۷)) و مقدار گرما (معادله (۱۵)) محاسبه گردد.

$$P = (25 - 15) / (98 - 15) = 0.1205$$

$$R = (98 - 65) / (25 - 15) = 3.3$$

$$P^* = \{ [(1 - 0.1205 \times 3.3) / (1 - 0.1205)]^{1/1} - 1 \} / \{ [(1 - 0.1205 \times 3.3) / (1 - 0.1205)]^{1/1} - 3.3 \} = 0.1205$$

$$F = \sqrt{1 + 3.3^2 \ln \{ [(1 - 0.1205 \times 3.3) / (1 - 0.1205)] / [(1 - 3.3) \ln \{ (2 - 0.1205(1 + 3.3 - \sqrt{1 + 3.3^2})) \}] \}} = 0.9848$$

$$LMTD = [(65 - 15) - (98 - 25)] / \ln \{ [(65 - 15) / (98 - 25)] \} = 60.78 \text{ °C}$$

$$Q = 53650 / 3600 \times 2684 (98 - 65) = 1319969 \text{ W}$$

$$k_t = (3.93 \times 10^{-14} / 7000)^{1/5.1} = 4.2 \times 10^{-4}$$

$$k_2 = (2.46 \times 10^{-11} / 42000)^{1/3.5} (19.1 / 15.4) = 5.5 \times 10^{-5}$$

$$k_3 = -0.9848 (60.78) / 1319969 = -4.5 \times 10^{-5}$$

$$k_4 = 1.5 \times 10^{-4} + 1.5 \times 10^{-4} (19.1 / 15.4) = 3.4 \times 10^{-4}$$





### ۳-۷- محاسبه تعداد و طول لوله‌ها

$$L = 28.4 / (\pi \times 0.0191 \times 368 \times 1) = 1.286 \text{ m}$$

با استفاده از رابطه پیوستگی زیر می‌توان تعداد لوله‌ها را محاسبه نمود.

(۳۲)

### ۴-۷- محاسبه قطر پوسته، فاصله و تعداد بفل‌ها

با توجه به رابطه تقریبی زیر می‌توان قطر پوسته را محاسبه نمود.

$$N_t = \pi D_s^2 / (4L_{tp}^2)$$

(۳۴)

$$D_s = \sqrt{4 \times 368 \times 0.0254^2 / 4} = 0.5498 \text{ m}$$

قطر پوسته عبارت است از:

با استفاده از رابطه پیوستگی زیر می‌توان فاصله بفل‌ها را محاسبه نمود.

$$M_s = \rho_s v_s L_{bc} (L_{tp} - D_t) (D_s / L_{tp})$$

(۳۵)

$$M_t = \rho_t v_t (\pi D^2 / 4) (N_t / NT)$$

تعداد لوله‌ها عبارت است از:

$$N_t = 31.58 / [(\pi \times 0.0154^2 / 4) (1/6) (998 \times 2.77)] = 367.98 \approx 368$$

با داشتن تعداد لوله‌ها و با استفاده از رابطه زیر می‌توان طول لوله‌ها را محاسبه

نمود.

$$N_t = A / (\pi D_t L N S)$$

(۳۳)

طول لوله‌ها عبارت است از:



فاصله بفل ها عبارت است از:

$$L_{bc} = (53650/3600) / [777 \times 0.73(0.0254 - 0.0191)(0.5498/0.0254)] = 0.1927 \text{ m}$$

با توجه به رابطه زیر می توان تعداد بفل ها را محاسبه نمود.

$$L = (N_b + 1)L_{bc} \quad (34)$$

تعداد بفل ها عبارت است از:

$$N_b = 1.286 / 0.1927 - 1 = 5.67 \approx 6 \quad (35)$$

با حل معادله (۱) برای  $x_{i+1}$  با  $f(x_{i+1})=0$  معادله زیر حاصل می گردد.

$$x_{i+1} = x_i - (f(x_i) / f'(x_i)) \quad (2)$$

معادله (۲) به صورت تکراری به کار گرفته می شود، تا همگرایی صورت پذیرد.

$$|x_{i+1} - x_i| \leq \epsilon_1 \quad \text{and/or} \quad |f(x_{i+1})| \leq \epsilon_2 \quad (3)$$

## ۸- نتیجه گیری

همان طور که از مطالعه موردی مشاهده می گردد، محاسبه به طور مستقیم صورت می گیرد و نیازی به حلقه های تکرار نمی باشد. از آن جایی که افت فشار و ضریب انتقال گرما در معادلات ارائه شده نسبت مستقیم با یکدیگر دارند، حداکثر بودن افت فشارها به اندازه مقدار مجازشان، به معنای حداکثر بودن ضرایب انتقال گرما می باشد. با حداکثر شدن ضرایب انتقال گرما، ضریب انتقال گرمای کلی به حداکثر مقدارش خواهد رسید. بنابراین با توجه به معادله پایه انتقال گرما در مبدل گرمایی، سطح مبدل گرمایی برای تبادل گرمای مشخص به حداقل می رسد. این موضوع باعث کاهش هزینه سرمایه گذاری اصلی و حداقل رسیدن هزینه سطح خواهد شد. در روش های معمول کرن، بل-دلور و مدل کنارگذر-نشستی ساده هیچ گاه مقدار افت فشارها به مقدار مجازشان نمی رسد، بنابراین طبق فلسفه ارائه شده، می توان نتیجه گرفت که مبدل گرمایی با سطح بهینه حاصل نگشته است. از این الگوی طراحی می توان برای بهینه کردن سطح مبدل های گرمایی فشرده همچون مبدل های گرمایی قاب و صفحه چند جریانی و مبدل های گرمایی صفحه-پره استفاده نمود.

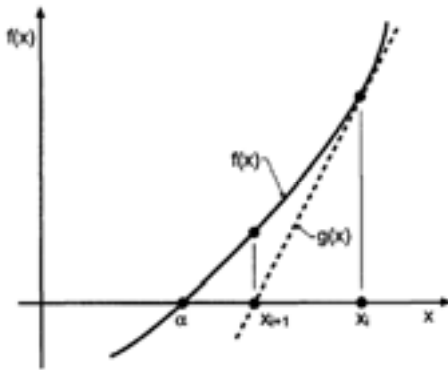
## پيوست

روش نیوتن-رافسون، یکی از معروف ترین روش های حل معادلات غیر خطی می باشد. اگر تقریب اولیه جواب  $(x_i)$  به اندازه کافی به ریشه  $(a)$  نزدیک باشد، در این صورت همگرایی در این روش وجود خواهد داشت. اگر  $f(x)$  یک تابع غیر خطی باشد، می توان  $g(x)$  را یک تابع خطی در نظر گرفت که  $f(x_i) = g(x_i)$  و در  $x_i$  مماس بر  $f(x)$  می باشد. در این حالت تقریب بعدی جواب  $(x_{i+1})$  را از حل کردن معادله خطی  $g(x) = 0$  می توان به دست آورد. حال با این  $x_{i+1}$  می توان  $g(x)$  دیگری تعریف کرد. این روش تکرار می یابد، تا همگرایی به جواب حاصل گردد. شیب تابع  $f(x)$  با رابطه زیر به دست می آید.

$$f'(x) = (f(x_{i+1}) - f(x_i)) / (x_{i+1} - x_i) \quad (1)$$

پی نوشت:

- 1 - RDA: Rapid Design Algorithm
- 2 - Kern's Method
- 3 - Bell-Delaware Method
- 4 - Simple Bypass-Leakage Model
- 5 - Rating
- 6 - Polley
- 7 - Sizing
- 8 - Peters and Timmerhaus
- 9 - Panjeh Shahi



شکل (۱): روش نیوتن-رافسون

- [1] U. V. Shenoy, "Heat Exchanger Network Synthesis", Gulf Publishing Co., 1995.
- [2] M. S. Peters, K. D. Timmerhaus, R. E. West, "Plant Design and Economics for Chemical Engineers", McGraw Hill, 2003.
- [3] E. A. D. Saunders, "Heat Exchangers Selection, Design & Construction", Longman Science & Technical, 1986.
- [4] G. F. Hewitt, G. L. Shries, T. R. Bott, "Heat Process Heat Transfer", CRC Press, 2000.
- [5] Joe D. Hoffman, Numerical Methods for Engineers and Scientists, Second Edition, 2001.



### فهرست نمادها و نشانه‌ها

$A$	سطح مبدل گرمایی، $m^2$	$N_c$	تعداد لقی‌های بین لوله‌ها در مجموعه پوسته
$a_0$	ضریب آرایش لوله	$N_r$	تعداد ردیف‌های لوله عرضی جریان سیال پوسته
$b_0$	ضریب اندازه و آرایش لوله	$N_t$	تعداد لوله‌ها در پوسته
$C_p$	گرمای ویژه، $J/(kg^\circ C)$	$N_{icc}$	تعداد ردیف‌های لوله عرضی نوک بفل و فضای بفل
$D$	قطر داخلی لوله، $m$	$N_{icw}$	تعداد ردیف‌های لوله عرضی یک پنجره بفل
$D_e$	قطر معادل، $m$	$NS$	تعداد پوسته
$D_s$	قطر پوسته، $m$	$NT$	تعداد گذر لوله
$D_t$	قطر خارجی لوله، $m$	$Nu$	عدد ناسلت
$F$	ضریب تصحیح دما	$P$	تأثیر گرمایی
$F_s$	ضریب اطمینان	$P^*$	تأثیر گرمایی
$f_i$	ضریب اصطکاک ایده‌آل	$Pr$	عدد پرانتل
$h$	ضریب انتقال گرما، $W / m^2 C$	$Q$	نرخ انتقال گرما، $W$
$j_b$	ضریب تصحیح کنار گذر دسته لوله برای انتقال گرما	$R$	نسبت ظرفیت گرما
$j_c$	ضریب تصحیح پنجره بفل برای انتقال گرما	$R_b$	ضریب تصحیح کنار گذر دسته لوله برای افت فشار
$j_h$	ضریب انتقال گرمای ایده‌آل	$R_d$	ضریب مقاومت کنیفی، $m^2 C / W$
$j_l$	ضریب تصحیح نشستی بفل برای انتقال گرما	$R_f$	ضریب تصحیح نشستی بفل برای افت فشار
$j_s$	ضریب تصحیح انتقال گرمای فاصله غیریکسان بفل	$R_s$	ضریب تصحیح منطقه انتهایی بفل برای افت فشار
$j_r$	ضریب تصحیح انتقال گرما جریان آرام	$Re$	عدد رینولدز
$K_s$	ضریب معادله (۳)	$T$	دما، $^\circ C$
$K_s'$	ضریب معادله (۱۰)	$U$	ضریب انتقال گرمای کلی، $W / m^2 C$
$K_{s1}$	ضریب معادله (۷)	$v$	سرعت سیال، $m / s$
$K_{s2}$	ضریب معادله (۷)		<b>علائم یونانی</b>
$K_{ss}$	ضریب معادله (۱۱)	$\Delta P$	اختلاف فشار، $Pa$
$K_t$	ضریب معادله (۱)	$\mu$	ویسکوزیته، $kg / (m.s)$
$k$	ضریب رسانایی گرمایی، $W / (m^\circ C)$	$\rho$	چگالی، $kg / m^3$
$k_i$	ضریب معادلات غیرخطی (۲۵)، (۲۷) و (۲۹)		<b>زیر نویس</b>
$L$	طول لوله، $m$	$c$	سیال سرد
$L_{bc}$	فاصله بین بفل‌ها، $m$	$h$	سیال گرم
$L_{pn}$	گام عرضی لوله نسبت به جریان، $m$	$i$	ورودی
$L_{pp}$	گام موازی لوله نسبت به جریان، $m$	$o$	خروجی
$L_{tp}$	گام لوله، $m$	$s$	سمت پوسته
$LMTD$	میانگین دمای لگاریتمی، $^\circ C$	$t$	سمت لوله
$M$	نرخ جریان، $kg / s$	$w$	دیواره
$N_b$	تعداد بفل‌ها		