



واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

درس مبدل های حرارتی

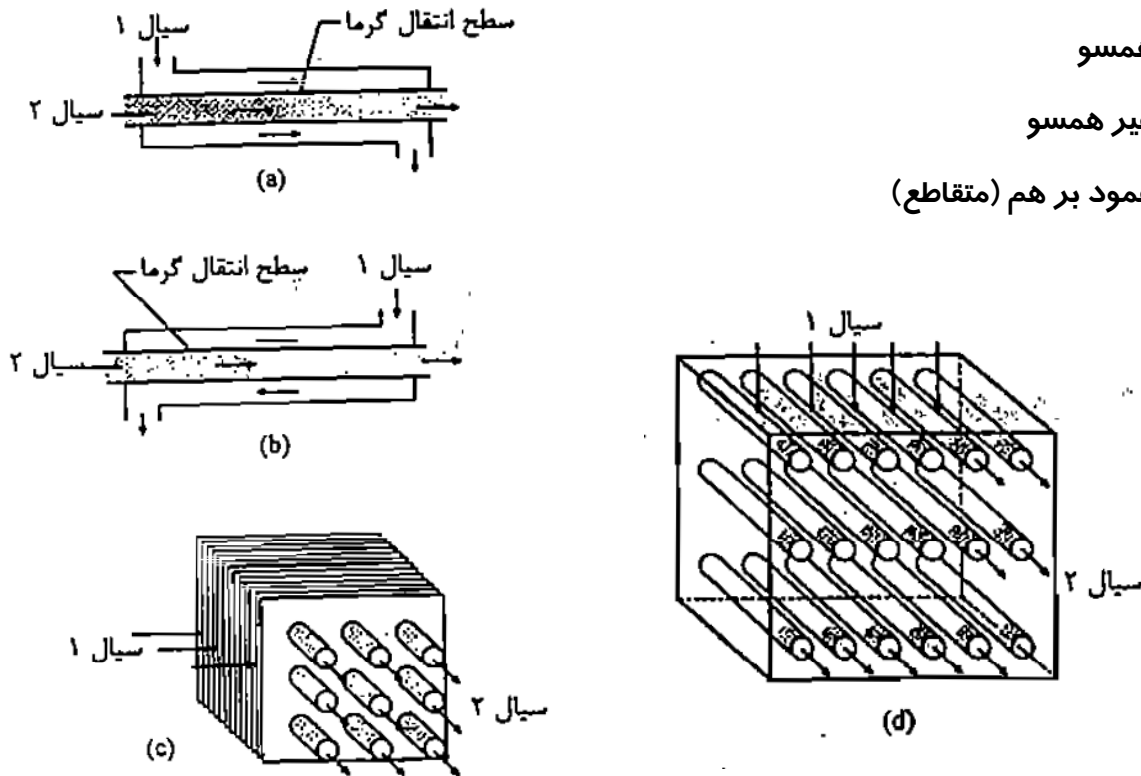
فصل دوم- روش های پایه طراحی مبدل های حرارتی

دکتر قاسم عرب

فهرست عناوین

۲

- ☐ آرایش مسیر جریان در مبدل ها
- ☐ معادلات پایه طراحی
- ☐ ضریب کلی انتقال حرارت
- ☐ روش متوسط لگاریتمی اختلاف دما (LMTD)
- ☐ روش ϵ -NTU
- ☐ محاسبات طراحی
- ☐ روش های طراحی
- ☐ مسایل



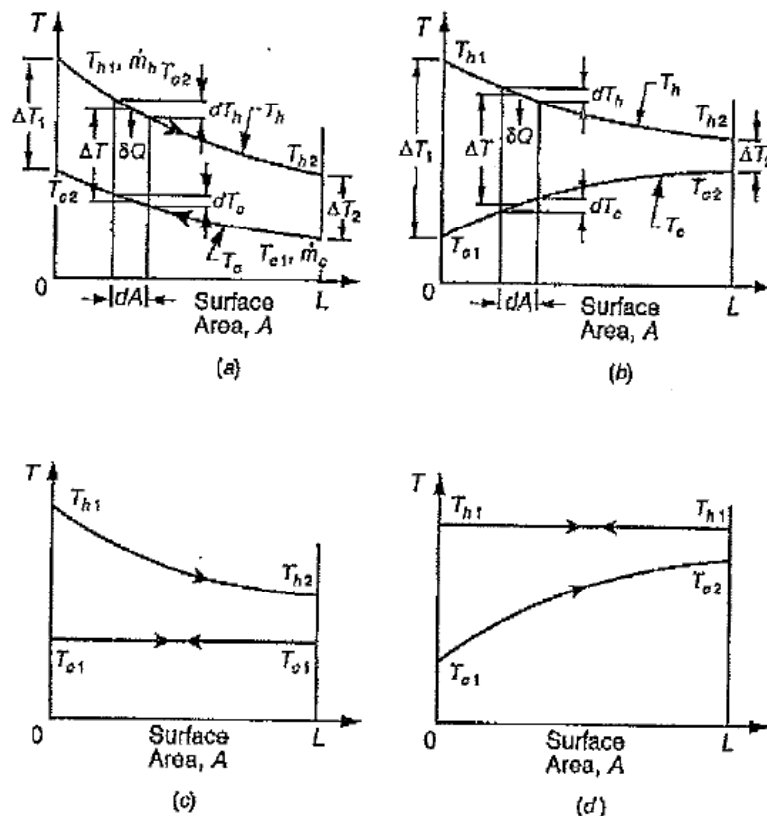
□ جریان همسو

□ جریان غیر همسو

□ جریان عمود بر هم (مقاطع)

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

معادلات پایه طراحی



□ طراحی یک مبدل علاوه بر معادلات پایه به ملاحظات ساختاری و اقتصادی نیز نیاز دارد.

□ هدف معادلات پایه طراحی، محاسبه میزان مساحت سطح انتقال حرارت مبدل (تعیین اندازه های نامی) است.

□ محاسبات عملکردی (مقدار گرمای منتقل شده، افت فشارها، دماهای خروجی سیال های گرم و سرد و ...) در مواقعی است که مبدل در دسترس باشد.

□ تغییرات دما در فرایندهای معمول انتقال حرارت

شکل ۳-۲: تغییر دمای سیال در مبادله کن های جریان هم جهت، جریان مخالف جهت، تبخیر کننده و چگالنده. (a) جریان مخالف جهت، (b) جریان هم جهت، (c) سیال سرد در حال تبخیر در دمای ثابت (d) سیال گرم در حال چگالش در دمای ثابت

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

در یک فرایند پایدار

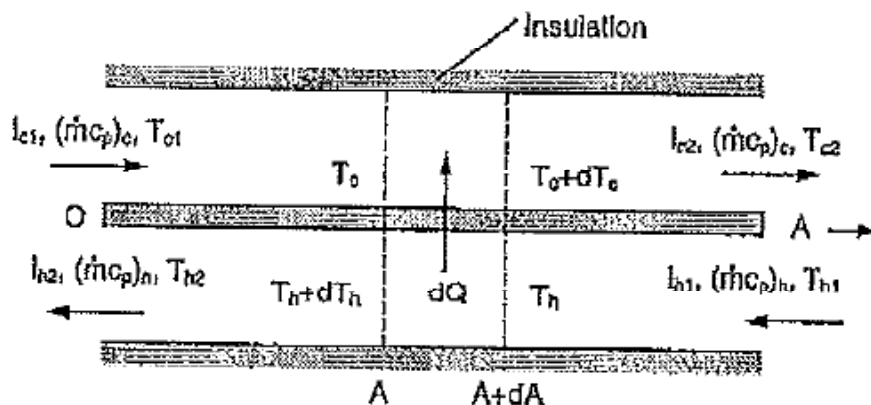
با انتگرال گیری

$$\delta Q = \dot{m} di \rightarrow Q = \dot{m}(i_2 - i_1) \rightarrow Q = \dot{m}_h(i_{h1} - i_{h2}) \text{ or } Q = \dot{m}_c(i_{c2} - i_{c1})$$

$$Q = (\dot{m}c_p)_h(T_{h1} - T_{h2}) \text{ or } Q = (\dot{m}c_p)_c(T_{c2} - T_{c1}) \rightarrow Q = UA\Delta T_m$$

ΔT_m تابعی از $T_{h1}, T_{h2}, T_{c1}, T_{c2}$ است

Q: انتقال حرارت i: آنتالپی c: جریان سرد h: جریان گرم Cp: ظرفیت گرمایی U: متوسط ضریب انتقال حرارت



مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

ضریب کلی انتقال حرارت (Overall heat transfer coefficient)

- دیواره مبدل ها معمولا از یک جنس مشخص ساخته می شود. گاهی ممکن است دیواره دوفلزی (فولاد پوشش داده شده با آلومینیم) یا با مواد پلاستیکی بعنوان محافظ در برابر خوردگی پوشش داده شده باشد.
 - با تشکیل رسوب، مقاومت اضافه ای در مقابل انتقال حرارت ایجاد می شود که به مرور زمان افزایش می یابد.
 - پره ها باعث افزایش سطح تبادل حرارت شده و مقاومت در برابر انتقال حرارت به روش جابجایی را کاهش می دهند.
 - ضریب انتقال حرارت برای یک دیواره تمیز بصورت زیر محاسبه می شود.
- $$UA = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{\frac{1}{h_i A} + \frac{t}{KA} + \frac{1}{h_o A}}$$
- که در آن R_t مقاومت گرمایی کل، t ضخامت دیواره و h_i, h_o بترتیب ضرایب انتقال حرارت جریان سیال خارجی و داخلی هستند.
 - برای مبدل های حرارتی لوله ای بدون پره و تمیز ضریب کلی انتقال حرارت عبارتست از:

$$U_o A_o = U_i A_i = \frac{1}{R_t} = \frac{1}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi KL} + \frac{1}{h_o A_o}}$$

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

ضریب کلی انتقال حرارت (Overall heat transfer coefficient)

۷

- رسوب بعنوان مقاومتی در برابر انتقال حرارت عمل می کند. ضریب انتقال حرارت رسوب (h_s) بر حسب مقاومت حرارتی رسوب (R_s) به صورت زیر است که در آن A سطح انتقال حرارت قبل از رسوب و ΔT_s افت دما در لایه رسوب است.

$$\frac{\Delta T_s}{Q} = R_s = \frac{1}{Ah_s}$$

- ضریب مقاومت رسوب نامیده می شود و دارای واحد $W/m^2.K$ است. $R_f = \frac{1}{h_s}$

- برای یک مبدل حرارتی که بر روی سطوح داخلی و خارجی آن رسوب تشکیل شده است داریم:

$$R_t = \frac{1}{UA} = \frac{1}{U_0 A_0} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{h_i A_i} + R_w + \frac{R_{fi}}{A_i} + \frac{R_{fo}}{A_o} + \frac{1}{A_o h_o}$$

- که در آن R_w با استفاده از روابط زیر بدست می آید.

$$R_w = t/kA$$

(برای دیواره تخت بدون پره)

$$R_w = \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi Lk}$$

(برای دیواره لوله ای بدون پره)

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

ضریب کلی انتقال حرارت سطوح پره دار

۸

- ممکن است هر دو طرف دیواره جداکننده دارای پره و به شکل های متفاوتی باشد. انتقال حرارت از پره ها (با اندیس f) از بخش دیواره بدون پره (با اندیس u) صورت می گیرد. با توجه به بازده فین (η_f) کل انتقال حرارت بصورت زیر بیان می شود:

$$Q = (\eta_f A_f h_f + A_u h_u) \Delta T$$

$$Q = hA \left[1 - \frac{A_f}{A} (1 - \eta_f) \right] \Delta T$$

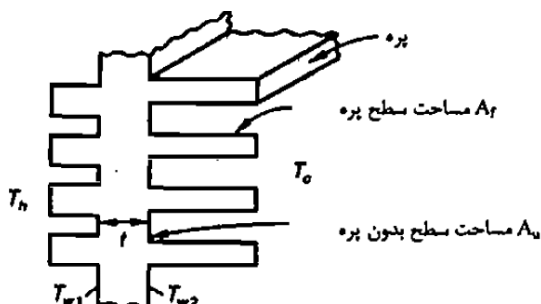
- که در آن $\Delta T = T_h - T_{w1}$ or $T_{w2} - T_c$. با در نظر گرفتن $h_u = h_f = h$ داریم:

$$Q = \eta h A \Delta T$$

- که در آن $\eta = [1 - (1 - \eta_f) A_f / A]$ بازده کلی سطح و $A = A_u + A_f$ مساحت کل سطح گرمایی در یک سمت است.

- بنابراین مقاومتی اضافی برابر $\frac{1}{\eta h A}$ برای هر طرف دیواره پره دار وجود دارد و مقاومت کلی دیواره پره دار بصورت زیر است:

$$R_t = \frac{1}{UA} = \frac{1}{U_0 A_0} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{\eta_i h_i A_i} + \frac{R_{fi}}{\eta_i A_i} + R_w + \frac{R_{fo}}{\eta_o A_o} + \frac{1}{\eta_o A_o h_o} \quad U_o = \frac{1}{\frac{A_o}{A_i} \frac{1}{\eta_i h_i} + \frac{A_o R_{fi}}{\eta_i A_i} + A_o R_w + \frac{R_{fo}}{\eta_o} + \frac{1}{\eta_o h_o}}$$



- مقدار بازدهی پره از روی مراجع در دسترس است. بعنوان مثال برای

- پره مستقیم بطول L و سطح مقطع یکنواخت و نوک پره آدیباتیک

$$\eta_f = \frac{\tanh(mL)}{mL}$$

- بازده پره بصورت زیر است.

$$m = \sqrt{\frac{\gamma h}{\delta k_f}} \quad \text{که در آن}$$

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

مرتبه بزرگی ضریب انتقال حرارت

سیال	h W/m ² .K
گازها (جابجایی طبیعی)	۳-۲۵
روغن موتور (جابجایی طبیعی)	۳۰-۶۰
جریان بخار فوق گرم یا هوا	۳۰-۳۰۰
جریان مایعات (غیر فلزی)	۱۰۰-۱۰۰۰۰
جریان مایعات (فلزی)	۵۰۰۰-۲۵۰۰۰۰
انتقال گرمای جوششی	
آب، فشار مطلق کوچکتر از ۵bar، $\Delta T = ۲۵ K$	۵۰۰۰-۱۰۰۰۰
آب، فشار مطلق کوچکتر از ۵ bar، $\Delta T = ۲۵ K$	۴۰۰۰-۱۵۰۰۰
جوشش فیلمی	۳۰۰-۴۰۰
انتقال گرما در چگالش بخار در فشار ۱ اتمسفر	
چگالش فیلمی روی لوله های افقی	۹۰۰۰-۲۵۰۰۰
چگالش فیلمی روی سطوح عمودی	۴۰۰۰-۱۱۰۰۰
چگالش قطره ای	۶۰۰۰۰-۱۲۰۰۰۰

□ برای مبدل های لوله ای بدون پره میزان ضریب کلی انتقال حرارت بصورت زیر است:

$$U_o = \frac{1}{\frac{r_o}{r_i} \frac{1}{h_i} + \frac{r_o}{r_i} R_{fi} + \frac{r_o \ln(\frac{r_o}{r_i})}{K} + R_{fo} + \frac{1}{h_o}}$$

□ برای دیواره بدون پره با ضخامت t و مقادیر h_i, h_o در دو طرف آن و وجود رسوب فقط بر روی سطح داخلی داریم:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{R_{fi}} + \frac{t}{K} + \frac{1}{h_o}$$

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

مثال

□ ضریب کلی انتقال حرارت (U) برای انتقال حرارت مایع - مایع از طریق صفحه فولادی با ضخامت 0.003 m و $k=50$ W/m²K را محاسبه نمایید. (ضریب رسوب در یک سمت داده شده است).

$$\frac{1}{R_{fi}} = 0.0002, h_o = 1800, \quad h_i = 2500$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{R_{fi}} + \frac{t}{k} + \frac{1}{h_o}$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{2500} + \frac{0.0002}{1} + \frac{0.003}{50} + \frac{1}{1800}$$

$$= 0.0004 + 0.0002 + 0.0006 + 0.00056 = 0.00172 \quad \text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$$

$$U \approx 582 \quad \text{W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

در این مورد، هیچیک از مقاومت های ناچیز نیستند.

□ در مساله قبل، یکی از جریان های مایع را با جریان گاز ($h_o = 50 \text{ W/m}^2\text{K}$) عوض کنید.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{2500} + \frac{0.002}{0.5} + \frac{0.003}{50} + \frac{1}{50}$$

$$= 0.0004 + 0.0002 + 0.00006 + 0.02 = 0.02066 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$U \approx 48 \text{ W/m}^2\text{K}$$

□ در این حالت فقط مقاومت گرمایی سمت گاز قابل توجه سات.

جریان مایع باقیمانده را با جریان گاز دیگری ($h_i = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$) عوض کنید:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{20} + \frac{0.002}{0.5} + \frac{0.003}{50} + \frac{1}{50}$$

$$= 0.05 + 0.0002 + 0.00006 + 0.02 = 0.07026 \text{ m}^2\text{K/W}$$

$$U = 14 \text{ W/m}^2\text{K}$$

در این مورد مقاومتهای گرمایی دیواره و لایه رسوب ناچیزند.

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

روش متوسط لگاریتمی اختلاف دما برای تحلیل مبدل های حرارتی (LMTD)

□ در تحلیل انتقال حرارت در مبدل های حرارتی، نرخ کلی انتقال حرارت Q کمیتی مهم است. برای مبدل های حرارتی با

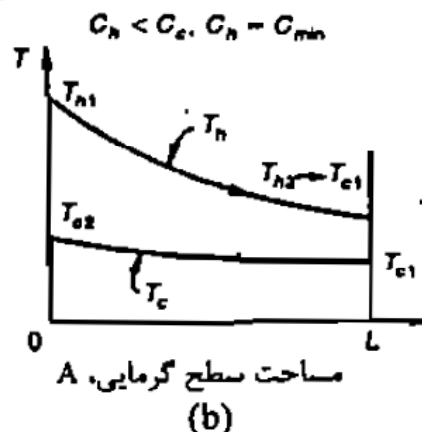
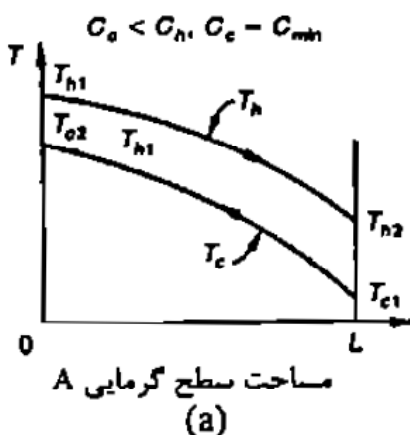
$$\delta Q = -(\dot{m}c_p)_h dT_h = \pm (\dot{m}c_p)_c dT_c$$

جریان مخالف یا همجهت، آدیاباتیک و پایدار داریم:

$$\delta Q = -C_h dT_h = \pm C_c dT_c$$

□ با انجام تحلیل های انتقال حرارت داریم:

$$Q = UA \frac{(T_{h1} - T_{c2}) - (T_{h2} - T_{c1})}{\ln \left(\frac{T_{h1} - T_{c2}}{T_{h2} - T_{c1}} \right)} \rightarrow Q = UA \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \rightarrow \begin{cases} \Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \\ Q = AU \Delta T_{lm} \end{cases}$$



□ در حالتی که $(\dot{m}c_p)_h = (\dot{m}c_p)_c$

$$Q = UA(T_h - T_c)$$

$$(T_h - T_c) = \Delta T_1 = \Delta T_2$$

□ در مبدل های جریان هم جهت

$$\Delta T_1 = (T_{h1} - T_{c1})$$

$$\Delta T_2 = (T_{h2} - T_{c2})$$

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

□ یک مبدل حرارتی پوسته لوله را در نظر بگیرید که از تعداد ۷۲ لوله با قطر خارجی 0.0254 m ساخته شده است. این مبدل 6.93 kg/s محلول اتیل الکل 95 % $(c_p=3810 \text{ J/kg.K})$ را از ۶۶ تا ۴۲ درجه سرد می نماید. آب خنک کننده با دبی 6.3 kg/s و دمای $(c_p=4187 \text{ J/Kg.K})$ 10 °C در دسترس است. اگر ضریب کلی انتقال حرارت بر مبنای سطح خارجی برابر $568 \text{ W/m}^2.\text{K}$ باشد، مساحت سطح و طول مبدل را در آرایش های زیر بدست آورید:

□ ۱- جریان هم جهت

□ ۲- جریان خلاف جهت

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

$$Q = (\dot{m}c_p)_h (T_{h1} - T_{hr})$$

$$Q = 6/93 \times 3810 \times (66 - 42) = 633 / 679 \times 10^3 \text{ W}$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2})} = \frac{56 - 8}{\ln(\frac{56}{8})} = 24 / 67^\circ \text{C}$$

$$Q = U_o A_o \Delta T_{lm}$$

$$A_o = \frac{Q_o}{U_o \Delta T_{lm}} = \frac{633 / 679 \times 10^3}{568 \times 24 / 67} = 45 / 22 \text{ m}^2$$

از آنجا که $A_o = \pi d_o N_T L$ است، طول مورد نیاز برای مبادله کن گرمایی می تواند بصورت زیر بدست آید:

$$L = \frac{A}{d_o \pi N_T} = \frac{45 / 22}{0.0254 \times \pi \times 72} = 7 / 87 \text{ m}$$

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

$$T_{cr} = \frac{Q}{(\dot{m}c_p)_c} + T_{ci}$$

$$T_{cr} = \frac{633 / 679 \times 10^3}{6 / 93 \times 4187} + 10 = 34^\circ \text{C}$$

برای آرایش جریان مخالف جهت

$$\Delta T_{lm} = \Delta T_l = \Delta T_r = 22^\circ \text{C}$$

$$A = \frac{Q}{U \Delta T_{lm}} = \frac{622 / 679 \times 10^3}{568 \times 22} = 34 / 86 \text{ m}^2$$

$$L = \frac{A}{d_o \pi N_T} = \frac{34 / 86}{0.0254 \times \pi \times 72} = 6.07 \text{ m}$$

بنابراین، مساحت سطح مورد نیاز تحت شرایط یکسان نرخ انتقال گرمای مشخص Q ، برای آرایش جریان مخالف جهت، کوچکتر از مقدار مربوط به یک آرایش جریان هم جهت است.

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

مبدل های حرارتی با جریان های چند گذر و متقاطع

□ LMTD تعریف شده برای تحلیل انتقال حرارت در مبدل های با جریان های چند گذر و متقاطع نمی تواند استفاده شود. برای تحلیل این مبدل ها داریم:

$$Q = UA \Delta T_m$$

$$\Delta T_{lm,cf} = \frac{(T_{hr} - T_{cl}) - (T_{hl} - T_{cr})}{\ln[(T_{hr} - T_{cl}) / (T_{hl} - T_{cr})]}$$

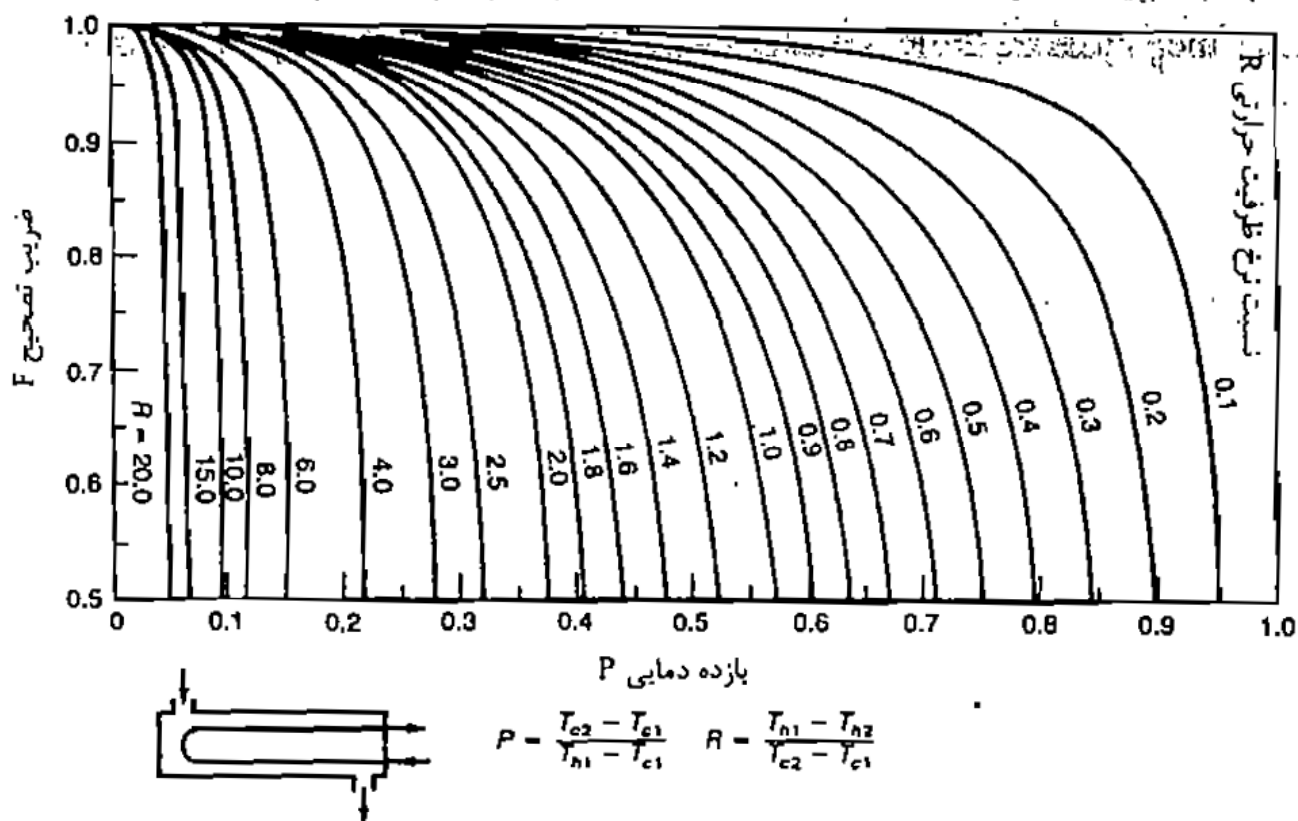
$$P = \frac{T_{cr} - T_{cl}}{T_{hl} - T_{cl}} = \frac{\Delta T_c}{\Delta T_{max}}$$

$$R = \frac{C_c}{C_h} = \frac{T_{hl} - T_{hr}}{T_{cr} - T_{cl}}$$

$$Q = UAF \Delta T_{lm,cf}$$

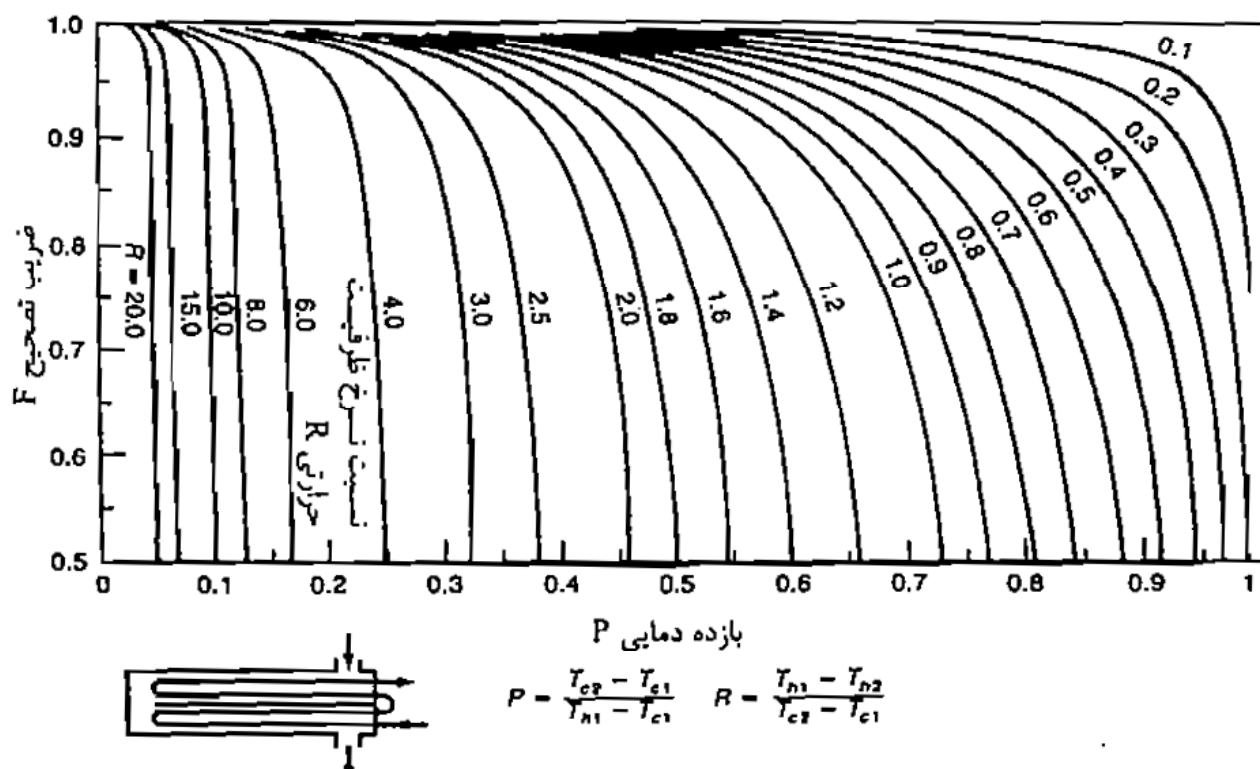
$$F = \Phi(P, R \text{ و جریان})$$

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)



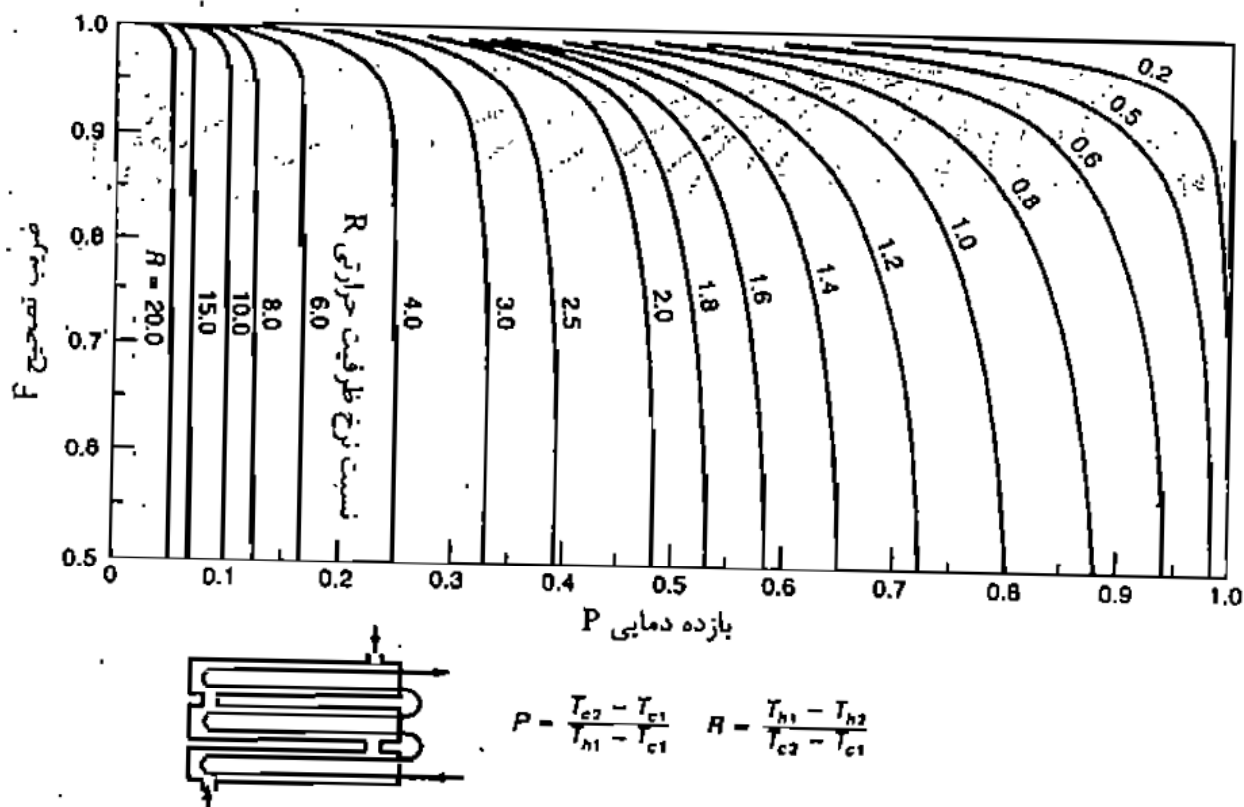
شکل ۷-۲: ضریب تصحیح LMTD، F ، برای مبادله کن گرمای پوسته‌ای و لوله‌ای با یک گذر پوسته و دو یا ضرایبی از دو گذر لوله [۷]

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)



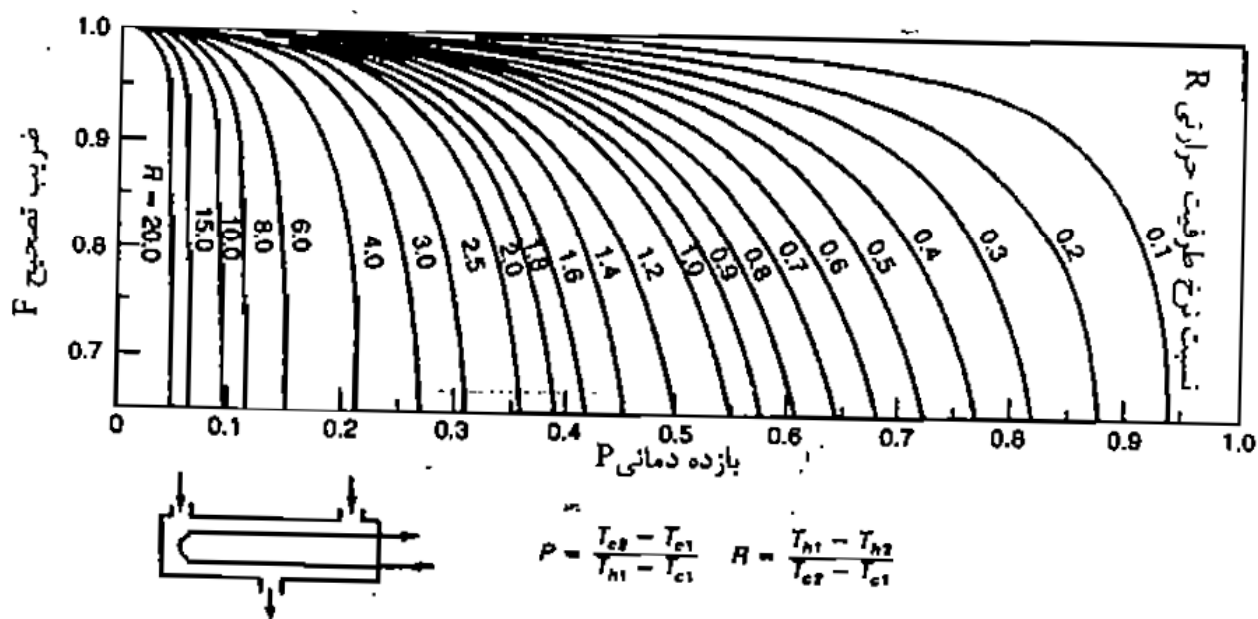
شکل ۸-۲: ضریب تصحیح LMTD، F ، برای مبادله کن گرمای پوسته‌ای و لوله‌ای با دو گذر پوسته و چهار یا ضرایبی از چهار گذر لوله [۷].

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)



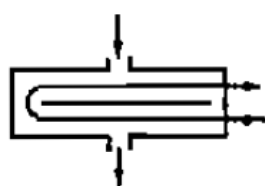
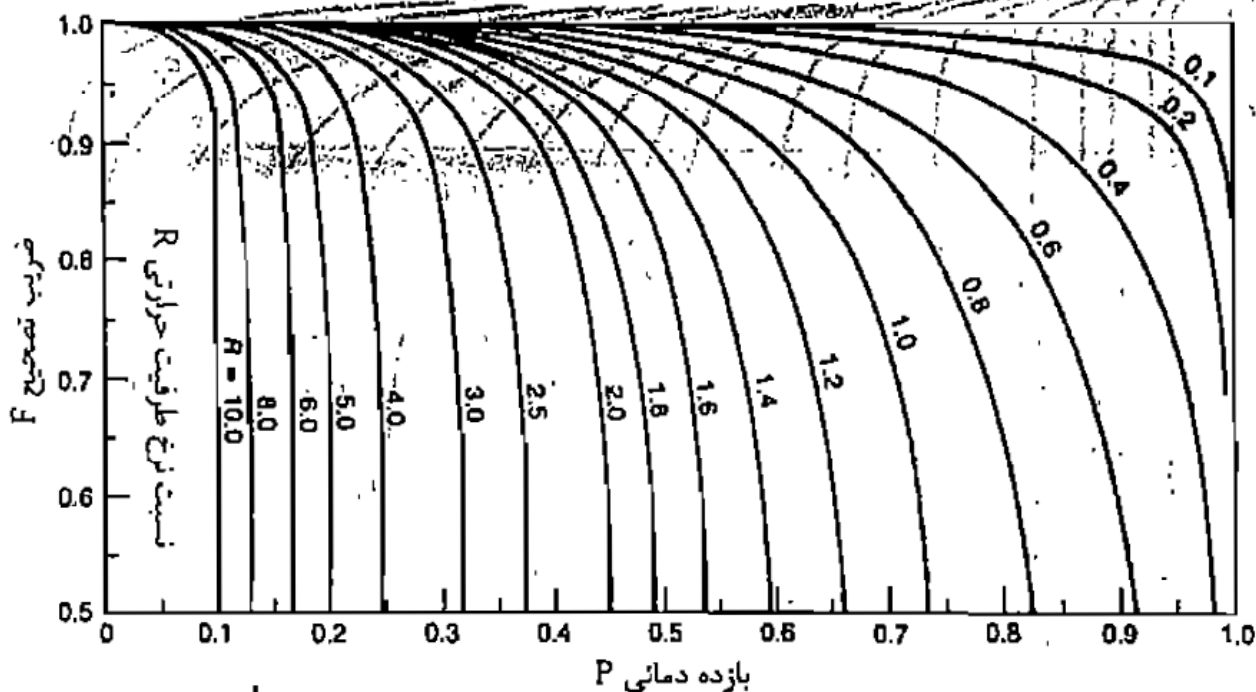
شکل ۹-۲: ضریب تصحیح LMTD، F ، برای مبادله کن گرمای پوسته‌ای و لوله‌ای با سه گذر پوسته و شش یا ضرایبی از شش گذر لوله [۷].

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)



شکل ۱۰-۲: ضریب تصحیح LMTD، F ، برای مبادله کن گرمای نوع پوسته‌ای با جریان تقسیم شده با یک گذر پوسته و تعداد زوجی از گذرهای لوله [۷]

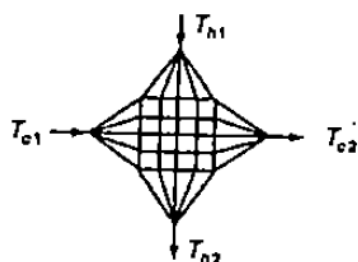
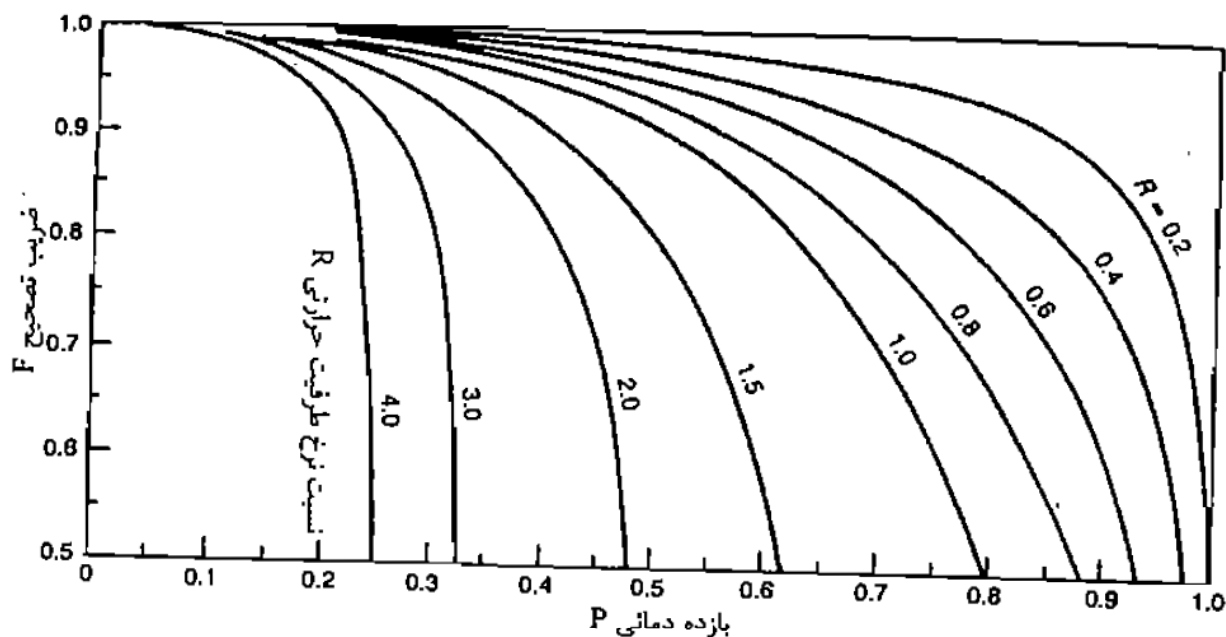
مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)



$$P = \frac{T_{c2} - T_{c1}}{T_{h1} - T_{c1}} \quad R = \frac{T_{h1} - T_{h2}}{T_{c2} - T_{c1}}$$

شکل ۱۱-۲: ضریب تصحیح F ، $LMTD$ ، برای مبادله کن گرمای نوع پوسته ای با جریان دو نیم شده با یک گذر پوسته و دو گذر لوله [۷]

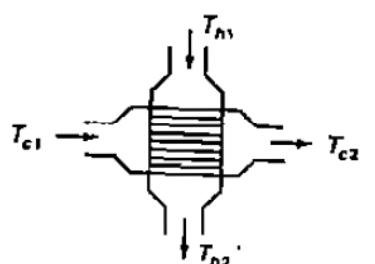
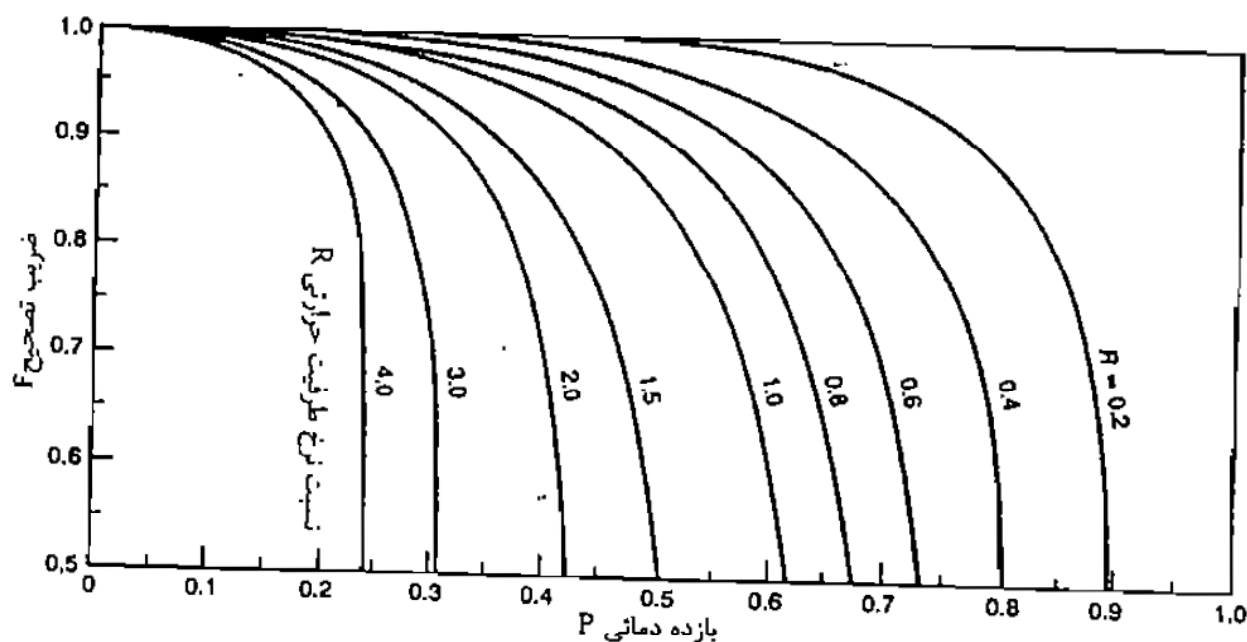
مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)



$$P = \frac{T_{c2} - T_{c1}}{T_{h1} - T_{c1}} \quad R = \frac{T_{h1} - T_{h2}}{T_{c2} - T_{c1}}$$

شکل ۱۳-۲: ضریب تصحیح F ، $LMTD$ ، برای مبادله کن گرما با جریان متقاطع، در حالت هر دو جریان مخلوط نشده [۸]

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)



$$P = \frac{T_{c2} - T_{c1}}{T_{h1} - T_{c1}} \quad R = \frac{T_{h1} - T_{h2}}{T_{c2} - T_{c1}}$$

شکل ۱۴-۲: ضریب تصحیح LMTD، F ، برای مبادله‌کن‌گرما با جریان متقاطع یک‌گذر با یک سیال مخلوط شده و یک سیال مخلوط نشده [۸]

مبدل‌های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

مثال

□ مثال قبل را برای مبدل حرارتی پوسته و لوله با یک‌گذر پوسته و ضرایبی از دو گذر لوله حل نمایید.

$$Q = UAF\Delta T_{lm,cf}$$

$$P = \frac{T_{c2} - T_{c1}}{T_{h1} - T_{c1}} = \frac{24}{56} = 0.4286$$

$$R = \frac{T_{h1} - T_{h2}}{T_{c2} - T_{c1}} = \frac{24}{24} = 1.0$$

از شکل (۷-۲)، $F = 0.89$ بدست می‌آید، پس

$$A = \frac{Q}{UAT_m} = \frac{622 / 68 \times 10^3}{568 \times 22 \times 0.89} = 29.17 \text{ m}^2$$

$$L = \frac{A}{\pi d_o N_T} = \frac{29.17}{\pi \times 0.254 \times 72} = 6.19 \text{ m}$$

مبدل‌های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

برای گرمایش آب، با گاز داغ خروجی از یک سیستم، از مبادله‌کن گرما با دو گذر پوسته و چهارگذر لوله استفاده شده است. آب در دمای 50°C به لوله وارد و در دمای 125°C با نرخ جریان 10 kg/s از آن خارج می‌شود، در حالیکه گاز داغ در دمای 300°C به پوسته وارد می‌شود و در دمای 125°C آنرا ترک می‌کند. کل سطح انتقال گرما، 800 m^2 است. ضریب کلی انتقال گرما را محاسبه کنید.

$$Q = UAF\Delta T_{lm,cf}$$

با داشتن :

$$P = \frac{\Delta T_c}{T_{h1} - T_{c1}} = \frac{75}{300 - 50} = 0.25$$

$$R = \frac{T_{h1} - T_{h2}}{T_{c2} - T_{c1}} = \frac{300 - 125}{125 - 50} = 2.5$$

$$\Delta T_{lm,cf} = \frac{\Delta T_r - \Delta T_1}{\ln\left(\frac{\Delta T_r}{\Delta T_1}\right)} = \frac{175 - 75}{\ln\left(\frac{175}{75}\right)} = 118^{\circ}\text{C}$$

از شکل (۲-۸) نتیجه می‌شود $F \approx 0.96$ ، برای آب در $87/5^{\circ}\text{C}$ و $c_p = 4203 \text{ J/kg.K}$

$$U = \frac{(\dot{m}c_p)_c (T_{c2} - T_{c1})}{AF \Delta T_{m,cf}} = \frac{10 \times 4203 (125 - 50)}{800 \times 0.96 \times 118} = 24/8 \text{ W/m}^2.\text{K}$$

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرداری)

یک مبادله‌کن گرما با جریان متقاطع، یک گذر لوله ای پره دار، با هر دو سیال مخلوط نشده صورتی که در شکل (۲-۱۳) نشان داده شده است، برای گرمایش هوا با آب گرم استفاده شده است. نرخ کلی انتقال گرما 200 kW می‌باشد. آب در 85°C به لوله وارد و در 30°C از آن خارج می‌شود، در حالیکه هوا در 15°C به سمت پره دار وارد و در 50°C خارج می‌گردد. ضریب کلی انتقال گرما $75 \text{ W/m}^2.\text{K}$ است. مساحت سطح مورد نیاز انتقال گرما را محاسبه کنید.

$$A = \frac{Q}{UAF\Delta T_{lm,cf}}$$

با

$$P = \frac{\Delta T_c}{T_{h1} - T_{c1}} = \frac{50 - 15}{85 - 15} = 0.577; \quad R = \frac{T_{h1} - T_{h2}}{T_{c2} - T_{c1}} = \frac{85 - 30}{50 - 15} = 1.577$$

از شکل (۲-۱۳) بدست می‌آید $F \approx 0.80$

$$\Delta T_{lm,cf} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_r}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_r)} = \frac{75 - 15}{\ln\left(\frac{75}{15}\right)} = 23/6^{\circ}\text{C}$$

$$A = \frac{200 \times 10^3}{75 \times 0.80 \times 23/6} = 141/2 \text{ m}^2$$

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرداری)

هوا با نرخ 5 kg/s در یک مبادله‌کن گرمای پوسته‌ای و لوله‌ای در جریان است و با آبی که در 90°C وارد و در 60°C خارج می‌شود، از 20°C به 50°C گرم می‌گردد. ضریب کلی انتقال گرما 400 W/m^2 و طول مبادله‌کن گرما، 2 m می‌باشد. مساحت سطح مبادله‌کن گرما و تعداد لوله‌های مورد نیاز را در شرایط ذکر شده زیر، بیابید:

۱- یک گذر پوسته و دو گذر لوله (مبادله‌کن‌های ۱-۲)

۲- دو گذر پوسته و چهار گذر لوله (مبادله‌کن‌های ۲-۴)

لوله‌ها از نوع اسکجول $1/4$ با قطر نامی $\frac{3}{4}$ اینچ هستند.

برای هوا در 35°C ، $C_p = 1005 \text{ J/kg.K}$ است.

$$Q = (\dot{m}c_p)_c (T_{cr} - T_{cl}) = 1005 \times 5(50 - 20) = 15075 \text{ kW}$$

مبدل‌های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

مثال - ادامه

۱- سطح انتقال گرمای مطلوب می‌تواند با استفاده از روش LMTD

$$P = \frac{T_{cr} - T_{cl}}{T_{hl} - T_{cl}} = \frac{50 - 20}{90 - 20} = 0.43 \quad \text{و} \quad R = \frac{T_{hl} - T_{hr}}{T_{cr} - T_{cl}} = \frac{90 - 60}{50 - 20} = 1$$

از شکل (۲-۷) نتیجه می‌شود که $F \approx 0.90$ می‌باشد.

$$\Delta T_{lm,cf} = \Delta T_l = \Delta T_r = 40^\circ\text{C}$$

$$A = \frac{Q}{UF\Delta T_{lm,cf}} = \frac{150750}{400 \times 0.9 \times 40} \quad A = 10.47 \text{ m}^2$$

$$A_T = \pi d_o l = \pi \times 0.2667 \times 2 \quad N_T = \frac{A}{A_T} = \frac{10.47}{0.1676} = 62 \text{ لوله}$$

$$A_T = 0.1676 \text{ m}^2$$

۲- برای مبادله‌کن گرمای پوسته‌ای و لوله‌ای با دو گذر پوسته و چهار گذر لوله (مبادله‌کن‌های ۲-۴)، از شکل (۲-۸)، $F \approx 0.975$ بدست می‌آید. تعداد لوله‌ها برابر است با:

$$N_T = \frac{Q}{UF\Delta T_{lm,cf}(\pi d_o L)} = \frac{150750}{400 \times 0.975 \times 40(\pi \times 0.2667 \times 2)}$$

$$N_T \approx 58 \text{ لوله}$$

مبدل‌های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

- هنگامیکه دماهای ورودی و خروجی جریان های گرم و سرد معلوم نباشد برای استفاده از روش LMTD در تحلیل مبدل های حرارتی، از سعی و خطا استفاده می شود.
- مقدار همگرا شده LMTD این ضرورت را برآورده می نماید که حرارت منتقل شده در مبدل باید برابر با انتقال حرارت از سیال گرم به سرد به روش جابجایی باشد.
- برای اجتناب از روش سعی و خطا از روش تعداد واحدهای انتقال (NTU) بر مبنای مفهوم کارایی مبدل می تواند استفاده شود.
- این روش بر مبنای این واقعیت است که اختلاف دماهای ورودی و خروجی یک مبدل تابعی از UA/C_c و C_c/C_h هستند.

$$C^* = \frac{C_{min}}{C_{max}}$$

□ نسبت نرخ ظرفیت (Capacity rate ratio)

- که در آن C_{min} ، C_{max} مقادیر کمتر و بیشتر دو مقدار C_h ، C_c هستند و $C^* \leq 1$ است. حالت $C^* = 0$ مربوط به مقدار محدود C_{min} می باشد در حالیکه C_{max} دارای مقداری نزدیک به ∞ (یک سیال در حال چگالش یا تبخیر) است.

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

بازده انتقال حرارت در مبدل (Heat transfer effectiveness)

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{max}}$$

- که ε نسبت نرخ واقعی انتقال حرارت در مبدل به حداکثر نرخ انتقال حرارت ممکن بلحاظ ترمودینامیکی است، اگر مساحت سطح انتقال حرارت بینهایت بوده و مبدل از نوع مخالف جهت بود.

$$Q = (\dot{m}c_p)_h (T_{h1} - T_{hr}) = (\dot{m}c_p)_c (T_{cr} - T_{c1})$$

- انتقال حرارت واقعی با انرژی داده شده :

$$(T_{h1} - T_{hr}) < (T_{cr} - T_{c1})$$

اگر $C_h > C_c$ باشد آنگاه

$$(T_{h1} - T_{hr}) > (T_{cr} - T_{c1})$$

اگر $C_h < C_c$ باشد آنگاه

$$Q_{max} = (\dot{m}c_p)_c (T_{h1} - T_{c1})$$

اگر $C_c < C_h$ باشد

$$Q_{max} = (\dot{m}c_p)_h (T_{h1} - T_{c1})$$

اگر $C_h < C_c$ باشد

$$\varepsilon = \frac{C_h (T_{h1} - T_{hr})}{C_{min} (T_{h1} - T_{c1})} = \frac{C_c (T_{cr} - T_{c1})}{C_{min} (T_{h1} - T_{c1})}$$

- مقدار ε بین ۰ تا ۱ است.

$$Q = \varepsilon (\dot{m}c_p)_{min} (T_{h1} - T_{c1})$$

- برای یک ε و Q_{max} مشخص، نرخ واقعی انتقال حرارت برابر است با:

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

□ NTU اندازه بدون بعد انتقال حرارت مبدل را مشخص می نماید.

$$NTU = \frac{AU}{C_{min}} = \frac{1}{C_{min}} \int_A U dA$$

□ اگر مبدل یکبار گذر باشد با فرض $C_c > C_h$ باشد بنابراین $C_c = C_{max}$, $C_h = C_{min}$ خواهد بود بنابراین:

$$T_{h2} - T_{c1} = (T_{h1} - T_{c2}) \exp \left[-NTU \left(\pm 1 - \frac{C_{min}}{C_{max}} \right) \right]$$

□ که در آن + برای جریان مخالف جهت و (-) برای جریان هم جهت است.

□ با ساده سازی برای جریان مخالف جهت:

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 - C_{min}/C_{max})]}{1 - (C_{min}/C_{max}) \exp[-NTU(1 - C_{min}/C_{max})]}$$

□ با ساده سازی برای جریان هم جهت

$$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1 + C_{min}/C_{max})]}{1 + (C_{min}/C_{max})}$$

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

□ در شرایط خاص $C_{min}/C_{max} = 1$ داریم:

$$\varepsilon = \frac{NTU}{1 + NTU}$$

□ برای جریان مخالف جهت

$$\varepsilon = \frac{1}{2} (1 - e^{-2NTU})$$

□ برای جریان هم جهت

□ برای $C_{min}/C_{max} = 0$ که در دیگ های بخار و چکانده ها وجود دارد برای جریان های مخالف جهت یا همجهت داریم:

$$\varepsilon = 1 - e^{-NTU}$$

□ نکات در حالت کلی: $\varepsilon = \phi(NTU, C^*)$ (آرایش، جریان و C^*)

۱. میزان بازده انتقال حرارت مبدل (ε) با افزایش مقادیر NTU برای یک مقدار مشخص C^* افزایش می یابد.

۲. میزان بازده انتقال حرارت مبدل (ε) با کاهش C^* برای مقادیر NTU مشخص افزایش می یابد.

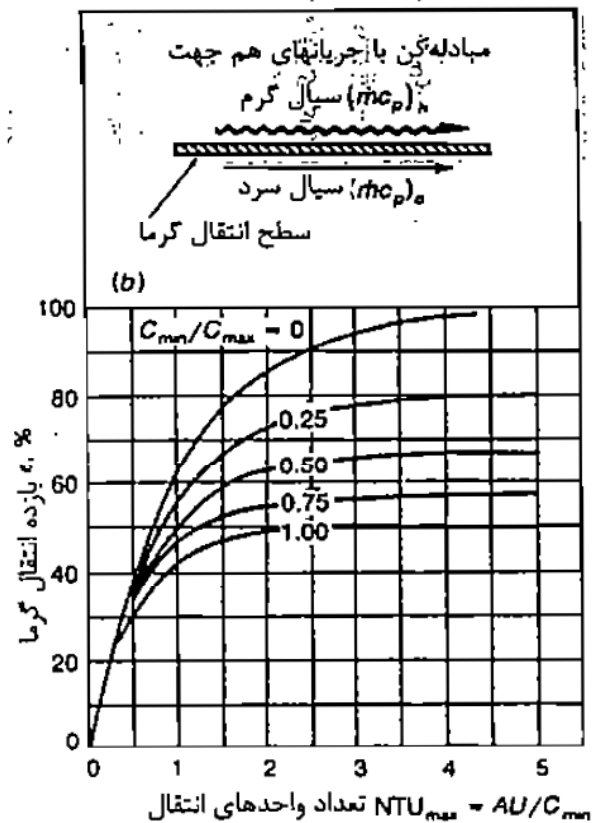
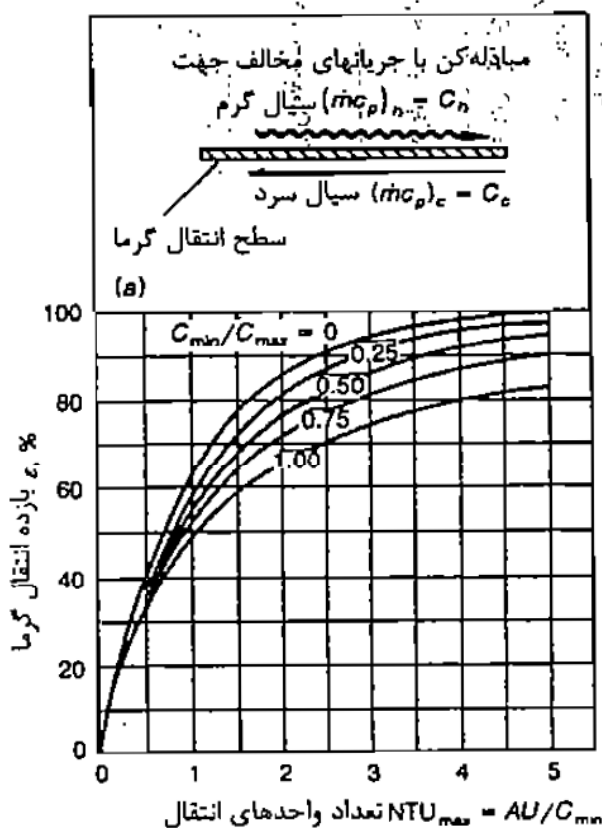
۳. برای $\varepsilon < 40\%$ نسبت نرخ ظرفیت گرمایی C^* اثر چندانی بر بازده انتقال حرارت در مبدل ها ندارد.

۴. در مقادیر زیاد ε برای افزایش کوچکی در ε افزایش عمده ای در NTU و بنابراین در اندازه مبدل مورد نیاز است.

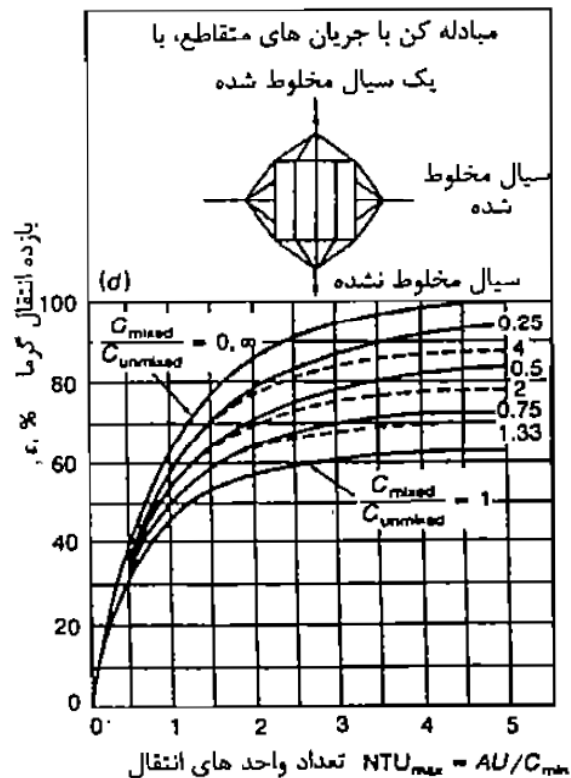
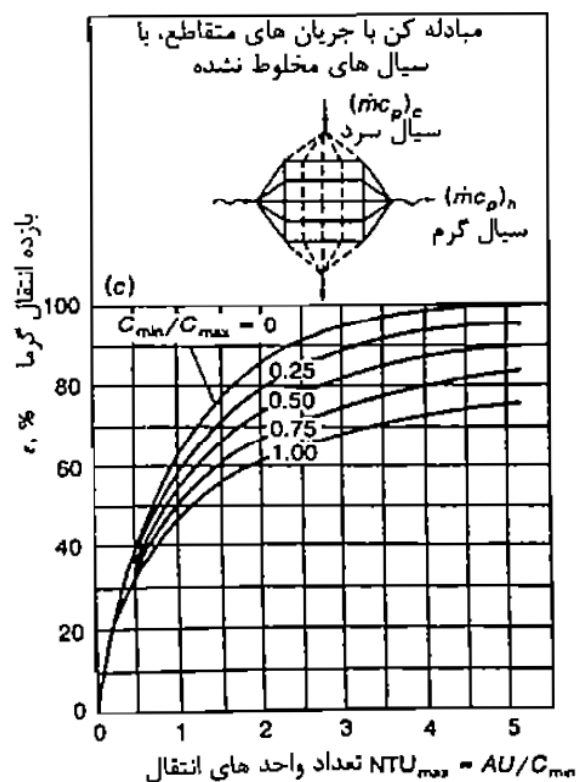
جدول ۲-۲: روابط ϵ - NUT برای آرایشهای متفاوت جریان

آرایش جریان	$\epsilon(NTU, C^*)$	$NTU(\epsilon, C^*)$	حالت خاص	مقدار ϵ
جریان مخالف جهت	$\epsilon = \frac{1 - \exp\left[-(1 - C^*)NTU\right]}{1 - C^* \exp\left[-(1 - C^*)NTU\right]}$	$NTU = \frac{1}{1 - C^*} \ln\left(\frac{1 - \epsilon C^*}{1 - \epsilon}\right)$	$\epsilon = 1 - \exp(-NTU)$	$\epsilon = 1$ برای تمامی مقادیر C^*
جریان هم جهت	$\epsilon = \frac{1}{1 + C^*} \left[1 - \exp\left[-(1 + C^*)NTU\right]\right]$	$NTU = \frac{1}{1 + C^*} \ln\left(1 + \epsilon(1 + C^*)\right)$	$\epsilon = 1 - \exp(-NTU)$	$\epsilon = \frac{1}{1 + C^*}$
جریان متقاطع، سیال با C_{min} مخلوط شده است	$\epsilon = 1 - \exp\left[\frac{1 - \exp(-C^*NTU)}{C^*}\right]$	$NTU = \frac{1}{C^*} \ln\left(1 + C^* \ln(1 - \epsilon)\right)$	$\epsilon = 1 - \exp(-NTU)$	$\epsilon = 1 - \exp\left(-\frac{1}{C^*}\right)$
جریان متقاطع، سیال با C_{max} مخلوط شده است	$\epsilon = \frac{1}{C^*} \left[1 - \exp\left(-C^* (1 - \exp(-NTU))\right)\right]$	$NTU = -\ln\left(1 + \frac{1}{C^*} \ln(1 - \epsilon C^*)\right)$	$\epsilon = 1 - \exp(-NTU)$	$\epsilon = \frac{1}{C^*} [1 - \exp(-C^*)]$
مبادله کن گرمای ۱-۲ پوسته ای و لوله ای	$\epsilon = \frac{1 + \exp\left[-NTU \left(1 + C^* \right)^{\frac{1}{r}}\right]}{1 + C^* + \left(1 + C^* \right)^{\frac{1}{r}} - \exp\left[-NTU \left(1 + C^* \right)^{\frac{1}{r}}\right]}$	$NTU = \frac{1}{\left(1 + C^* \right)^{\frac{1}{r}}} \ln \left[\frac{r - \epsilon \left(1 + C^* + \left(1 + C^* \right)^{\frac{1}{r}}\right)}{r - \epsilon \left(1 + C^* + \left(1 + C^* \right)^{\frac{1}{r}}\right)} \right]$	$\epsilon = 1 - \exp(-NTU)$	$\epsilon = \frac{r}{1 + C^* + \left(1 + C^* \right)^{\frac{1}{r}}}$

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرداری)



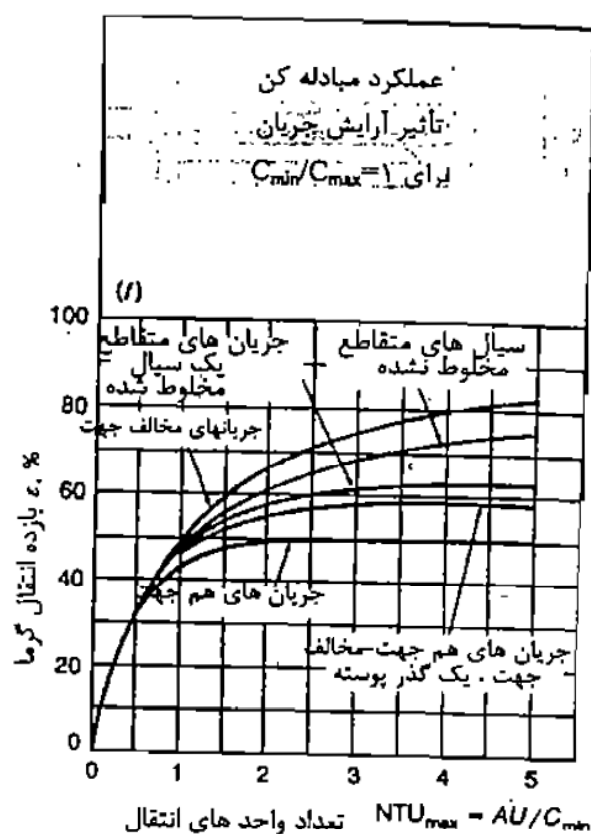
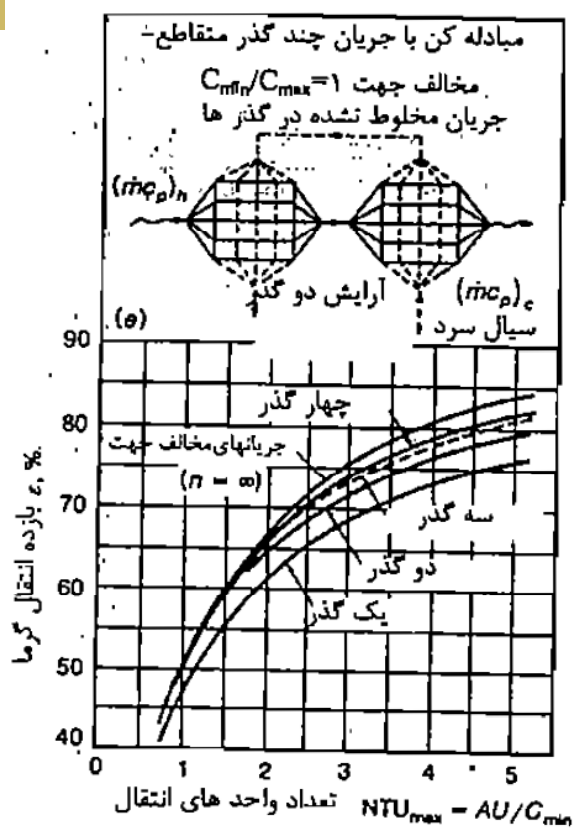
مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرداری)



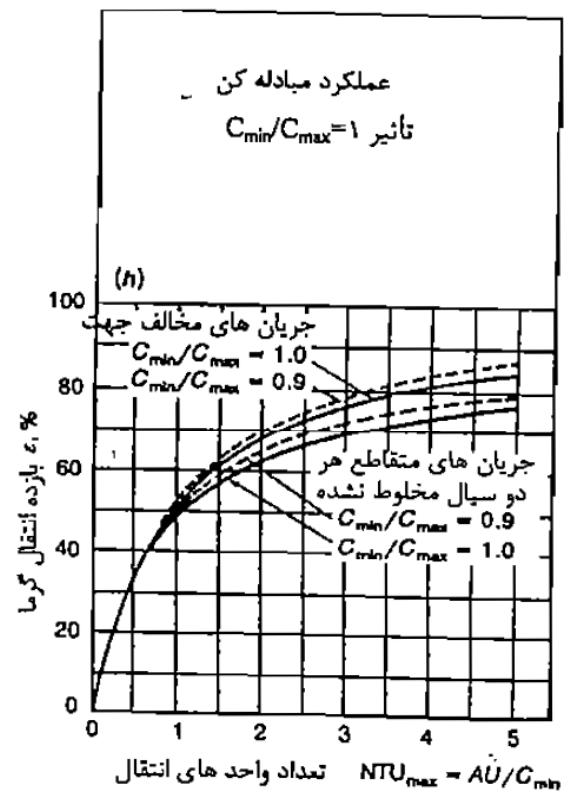
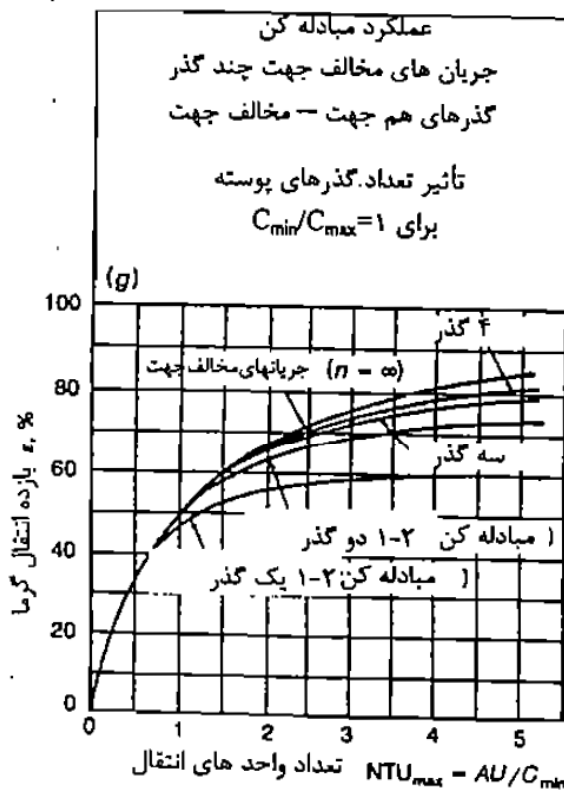
a

شکل ۱۵-۲: بازده انتقال گرما برحسب NTU برای آرایش های متفاوت جریان [۹]

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)



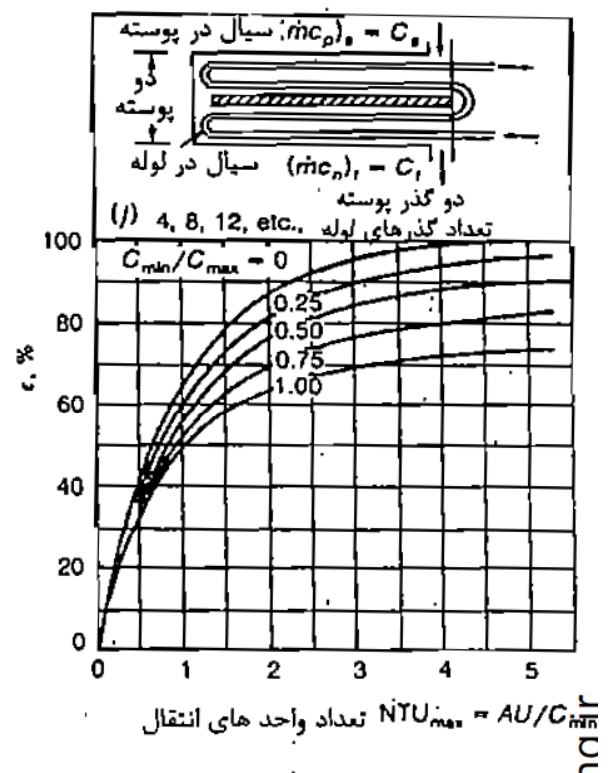
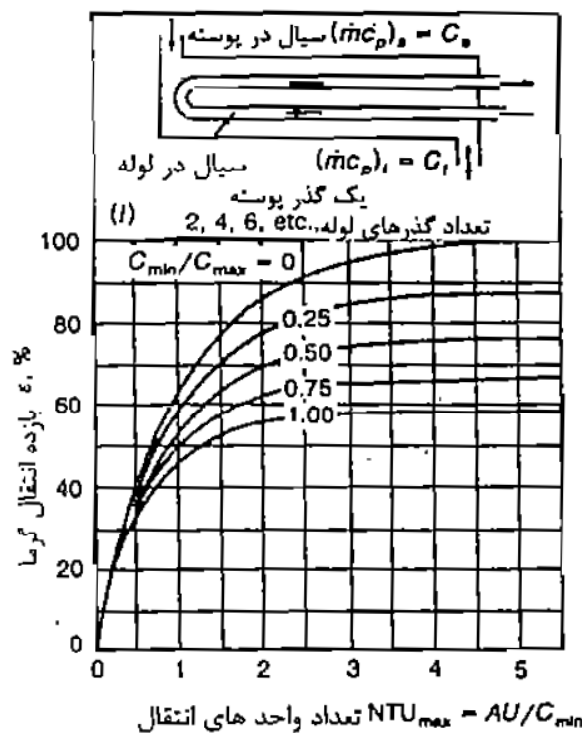
مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)



b

شکل ۱۵-۲: ادامه

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)



c

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

جدول ۲-۳: معادلات استفاده شده در روش های LMTD و $\epsilon - NTU$

LMTD	$\epsilon - NTU$
$Q = UAF\Delta T_{lm,cf}$ $LMTD = \Delta T_{lm,cf} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}$ $\Delta T_1 = T_{h1} - T_{c2}, \Delta T_2 = T_{h2} - T_{c1}$ $P = \frac{T_{c2} - T_{c1}}{T_{h1} - T_{c1}}, R = \frac{T_{h1} - T_{h2}}{T_{c2} - T_{c1}}$ $F = \phi(P, R \text{ و آرایش جریان})$	$Q = \epsilon (\dot{m}C_p)_{\min} (T_{h1} - T_{c1})$ $\epsilon = \frac{C_h(T_{h1} - T_{h2})}{C_{\min}(T_{h1} - T_{c1})} = \frac{C_c(T_{c2} - T_{c1})}{C_{\min}(T_{h1} - T_{c1})}$ $C^* = \frac{C_{\min}}{C_{\max}} = \frac{(\dot{m}C_p)_{\min}}{(\dot{m}C_p)_{\max}}$ $NTU = \frac{UA}{C_{\min}} = \frac{1}{C_{\min}} \int U dA$ $\epsilon = \phi(NTU, C^* \text{ و آرایش جریان})$

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

مثال

یک مبادله کن گرمای پوسته ای و لوله ای، با دو گذر لوله و یک گذر پوسته دارای دیوارک، بعنوان خنک کن روغن استفاده می شود. آب خنک کننده در 20°C با نرخ $4/0.82 \text{ kg/s}$ در لوله ها جریان می یابد. روغن موتور، با دبی 10 kg/s به پوسته وارد می شود.

حل:

روش LMTD - ابتدا باید نرخ انتقال گرما Q و LMTD برای جریان مخالف جهت را محاسبه کنیم. سپس P ، R و ضریب تصحیح F ، تعیین خواهند شد. نهایتاً با بکار بردن معادله نرخ انتقال گرما (۲-۳۶)، مساحت سطح انتقال گرما، A ، تعیین می گردد.

نرخهای ظرفیت گرمایی برای سیال سمت پوسته (روغن) و سیال سمت لوله (آب) عبارتند از:

$$C_h = (\dot{m}c_p)_h = 10 \text{ kg/s} \times 2118 \text{ J/kg.K} = 21180 \text{ W/K}$$

$$C_c = (\dot{m}c_p)_c = 4/0.82 \text{ kg/s} \times 4179 \text{ J/kg.K} = 17058 / 7 \text{ W/K}$$

نرخ انتقال گرما ، بکمک افت دمای روغن عبارتست از :

$$Q = C_h (T_{h1} - T_{h2}) = 21180 \times (90 - 60) = 635400 \text{ W}$$

۴۱

دمای آب خروجی ، از موازنه انرژی بصورت زیر بدست می آید :

$$Q = C_c (T_{c2} - T_{c1}) = 635400 \text{ W}$$

$$T_{c2} = \frac{635400}{C_c} + T_{c1} = \frac{635400}{17058 / 678} + 20 = 37 / 248 + 20 = 57 / 25^\circ \text{C}$$

اکنون باید $\Delta T_{lm,cf}$ تعیین گردد. از تعریف $\Delta T_{lm,cf}$ در معادله (۲-۲۸) برای آرایش جریان

مخالف جهت :

$$\Delta T_{lm,cf} = \frac{37 / 25 - 40}{\ln \left(\frac{37 / 25}{40} \right)} = 36 / 3^\circ \text{C}$$

اکنون ، مقادیر P , R از معادلات (۲-۳۴) و (۲-۳۵) عبارتند از :

$$P = \frac{T_{c2} - T_{c1}}{T_{h1} - T_{c1}} = \frac{57 / 25 - 20}{90 - 20} = \frac{37 / 25}{70} = 0 / 532$$

$$R = \frac{T_{h1} - T_{h2}}{T_{c2} - T_{c1}} = \frac{C_c}{C_h} = \frac{17058 / 7}{21180} = 0 / 805$$

بنابراین از شکل (۲-۷) $F = 0 / 85$ بدست می آید.

مساحت انتقال گرما از معادله (۲-۳۶) برابر است با :

$$A = \frac{Q}{UF \Delta T_{lm}} = \frac{635400}{262 \times 0 / 85 \times 36 / 3} = 78 / 6 \text{ m}^2$$

روش ϵ -NTU در روش ϵ -NTU ، ابتدا ϵ , C^* و سپس NTU و بعد از آن ، A تعیین می شوند. در این مسئله $C_h > C_c$ و از اینرو $C_c = C_{min}$:

۴۲

$$C^* = \frac{C_{min}}{C_{max}} = \frac{17058 / 7}{21180} = 0 / 805$$

از دماهای داده شده ، برای $C_c = C_{min}$ ، معادله (۲-۴۲) می دهد :

$$\epsilon = \frac{T_{c2} - T_{c1}}{T_{h1} - T_{c1}} = \frac{57 / 25 - 20}{90 - 20} = \frac{37 / 25}{70} = 0 / 532$$

اکنون NTU را از روابط جدول (۲-۲) و یا شکل (۲-۱۵) با درونیایی مناسب برای ϵ , NTU و

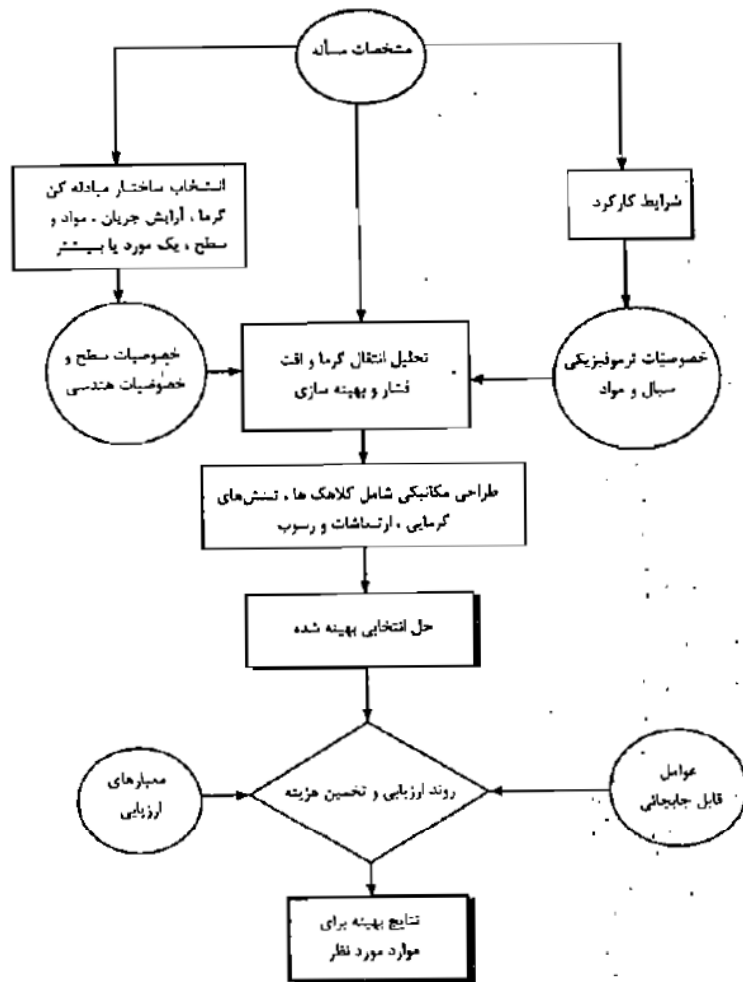
C^* ، محاسبه می کنیم. از جدول (۲-۲) برای مبادله کن گرمای پوسته ای و لوله ای با یک گذر پوسته و دو گذر لوله ، داریم :

$$\begin{aligned} NTU &= -\frac{1}{(1 + C^*)^2} \ln \left[\frac{2 - \epsilon \left[1 + C^* - (1 + C^*)^2 \right]}{2 - \epsilon \left[1 + C^* + (1 + C^*)^2 \right]} \right] \\ &= -\frac{1}{(1 + 0 / 805)^2} \ln \left[\frac{2 - 0 / 532 \left[1 + 0 / 805 - (1 + 0 / 805)^2 \right]}{2 - 0 / 532 \left[1 + 0 / 805 + (1 + 0 / 805)^2 \right]} \right] \\ &= 0 / 778965 \ln \left[\frac{1 / 7227}{0 / 35679} \right] = 1 / 226 \end{aligned}$$

بنابراین :

$$A = \frac{C_{min}}{U} NTU = \frac{17058 / 7}{262} \times 1 / 226 = 79 / 8 \text{ m}^2$$

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)



مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)

- ۱۰-۲ □
- ۱۲-۲ □
- ۱۴-۲ □
- ۱۵-۲ □
- ۱۹-۲ □

مبدل های حرارتی - دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) (شهرری)