

# مطالعه اثر توزیع نابرابر جریان و خواص فیزیکی متغیر سیال بر انتقال حرارت در مبدل های حرارتی قاب و صفحه در حالت گذرا

حسین شکوهمند

استاد گروه مهندسی مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

نیسا خارقانی

فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۸۲/۶/۱، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۳/۱۱/۳، تاریخ تصویب ۸۳/۱۱/۲۴)

## چکیده

در این مقاله پاسخ گذرای مبدل های حرارتی قاب و صفحه تحت تأثیر تغییرات ویسکوزیته و توزیع نابرابر جریان در کانال ها بررسی شده است. شرایط اولیه حرارتی برای کانال های گرم به صورت تابع پله ای ای منظور شده است. معادلات حاصل با استفاده از روش تفاضل محدود حل شده اند. آرایش های جریان مورد استفاده دو نوع  $U$  و  $Z$  می باشد. همچنین نتایج بدست آمده نشان می دهند که توزیع نابرابر جریان در دبی ثابت و با افزایش تعداد کانال تشدید می شود. و نیز در تحریک پله ای ای، با افزایش تعداد کانال ها، درجه حرارت سمت سرد افزایش و درجه حرارت سمت گرم کاهش می یابد. در نتیجه بر مقدار بازدهی حرارتی مبدل افزوده می شود.

**واژه های کلیدی:** پاسخ گذرا، پاسخ پله ای، انتقال حرارت جابجایی، ضریب جابجایی انتقال حرارت، تغییرات ویسکوزیته، توزیع نابرابر جریان، مبدل قاب و صفحه

## مقدمه

مدت زمان کارکرد خود قرار گیرد. حتی ممکن است کل یک سیستم طوری طراحی شده باشد که دائماً تحت تأثیر بار متغیر باشد. حالت های گذرا برای یک مبدل ممکن است بدلیل تغییر در شرایط کارکرد آن بوجود آیند که از آن جمله می توان تغییر در درجه حرارت سیال ورودی به مبدل، تغییر دبی ورودی به مبدل و یا بروز حالت های ناپایداری از جمله نوسان جریان در حالت جریان دو فازی را نام برد. بروز حالت های گذرا در یک مبدل می تواند نتایج نامطلوبی از قبیل کاهش میزان انتقال حرارت و پدید آمدن تنش های بسیار زیاد و نتیجتاً از کار افتادن مبدل را به دنبال داشته باشند. لذا شناخت و پیش بینی رفتار دینامیکی یا پاسخ حالت گذرای یک مبدل نیز علاوه بر رفتار حالت پایدار آن باید مد نظر قرار گیرد.

بررسی ریاضی توزیع جریان و انتقال حرارت در مبدل های حرارتی به دهه ۱۹۶۰ باز می گردد. Arpaci، Clark و Yang [۱] پاسخ دینامیکی (فرکانسی) مبدلهای حرارتی دارای منبع حرارتی داخلی را مورد مطالعه قرار دادند.

مبدل های حرارتی قاب و صفحه در صنایع نفت، پتروشیمی، غذایی و نوشابه سازی به میزان وسیعی مورد استفاده قرار می گیرند. اما از مهمترین دلایل پیشرفت سریع این صنعت در سال های اخیر، استفاده از آنها در صنایع دریایی، شیمیایی و تبدیل انرژی است که خود نیازمند افزایش درجه حرارت و فشار کارکرد، افزایش دبی سیال و نیز تنوع بیشتر سیالات با خواص متنوع است. جهت برآورده ساختن این اهداف، طراحی مبدل های حرارتی و نیز استفاده از مواد مقاوم تری برای گاسکت ها و سایر اجزای مبدل، دچار تحولاتی پیاپی شده و توسعه می یابند.

آگاهی از پاسخ گذرای یک مبدل حرارتی و نحوه عملکرد مبدل در حالت گذرا نه تنها در طراحی اولیه مبدل می تواند مفید واقع شود بلکه مهندس کنترل کننده فرایند را نیز در کنترل مناسب و دقیق فرایند کمک می کند. یک مبدل حرارتی عموماً جزئی از یک سیستم می باشد که ممکن است تحت تأثیر تغییرات گذرای از پیش تعیین شده یا غیر مترقبه ای در طول

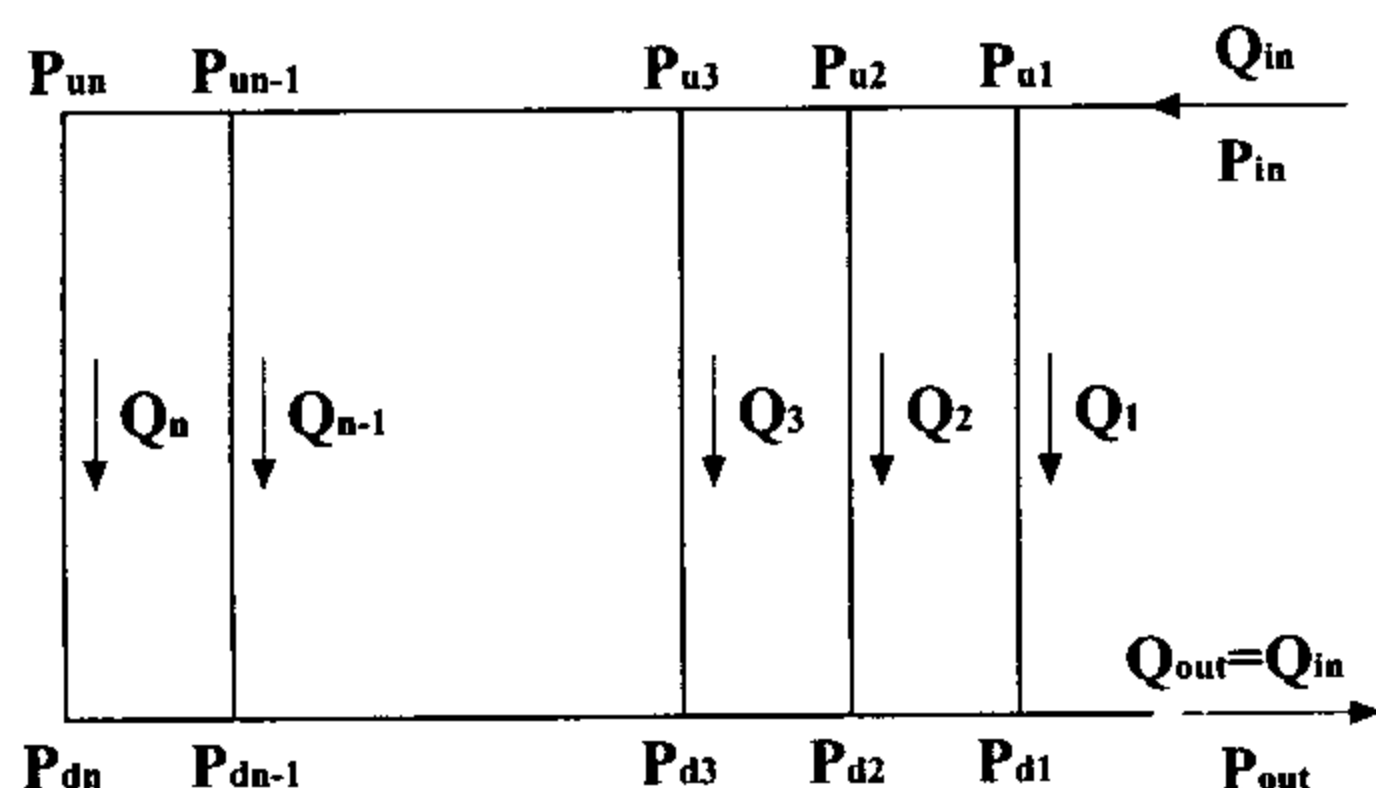
۴- سرعت سیال در طول هر کانال ثابت منظور شده است. ولی سرعت در کانال های مبدل یکسان نیست و توسط روابط بدست آمده جهت برآورد توزیع نابرابر جریان در مبدل محاسبه می شود.

۵- ظرفیت حرارتی دیواره کانال ها جهت حقیقی تر بودن حل مسئله منظور شده اند.

۶- انتقال حرارت در کانال های ابتدایی و انتهایی تنها از سوی یک دیواره صورت می گیرد.

۷- از انتقال حرارت میان کانال و هدر صرف نظر می شود.

۸- مبدل در حالت اولیه (پیش از اعمال محرک تحمیل کننده حالت گذرا) در حالت تعادل حرارتی (یکسان بودن درجه حرارت کانال های سرد و گرم) قرار دارد.



شکل ۱: آرایش جریان در یک مبدل حرارتی قاب و صفحه از نوع U.

### معادلات حاکم بر جریان

توزیع نابرابر جریان در مبدل بر فرایند انتقال حرارت اثر می گذارد. دلیل این امر آنستکه ضریب انتقال حرارت جابجایی در کانال های مبدل تابعی است از سرعت / دبی سیال در هر کانال. لذا تفاوت سرعت / دبی جریان در کانال ها باعث تفاوت مقدار ضریب انتقال حرارت جابجایی در هر کانال نسبت به کانال دیگر می شود. برای محاسبه جریان (سرعت) در کانال های یک مبدل حرارتی قاب و صفحه از روابط افت فشار و پیوستگی جریان در گره ها (انشعابات) استفاده می کنیم. اختلاف فشار بین هر دو گره مجاور نشان داده شده در شکل (۱) از رابطه ۱ محاسبه می شود.

$$\Delta P = f \frac{L}{2D\rho A^2} Q^2 \quad (1)$$

ضریب اصطکاک  $f$  برای هدر و کانال ها برای دو حالت

در دهه های اخیر و پس از استفاده روز افزون از مبدل های حرارتی قاب و صفحه در صنایع غذایی، نفت و پتروشیمی و صنایع دریایی مطالعات جدید تری بر روی پاسخ دینامیکی مبدل های حرارتی قاب و صفحه صورت گرفته است. Shah [۲] پاسخ گذرای مبدل های حرارتی و بازدهی حرارتی آنها را مطالعه نمود. Lakshmanan و Potter [۳] با مدلسازی انتقال حرارت در مبدل های حرارتی قاب و صفحه پاسخ دینامیکی آن را برای آرایش های متفاوت جریان بررسی کردند. Das و Roetzel [۴] و [۵] با منظور کردن جمله هدایت حرارتی در معادلات انتقال حرارت و نیز محاسبه تأخیر زمانی ورود سیال به هر کانال نسبت به کانال دیگر، پاسخ گذرای مبدل های حرارتی قاب و صفحه را برای ورودی پله ای و نیز ورودی های فرکانسی بررسی کردند. Das و Roetzel [۶] با ارائه مدل پیچیده تری به بررسی اثرات پیشروی موج هدایت حرارتی در موارد خاصی از قبیل درجه حرارت های Cryogenics و یا تحریک ناگهانی سیستم توسط یک دبی حرارتی شدید می پردازند.

مدل های ارائه شده فوق و کلاً مدل های ارائه شده جهت بررسی پاسخ گذرای مبدل های حرارتی قاب و صفحه فاقد مبحثی تحت عنوان بررسی اثر تغییرات ویسکوزیته و توزیع نابرابر جریان بر پاسخ گذرای می باشند. در این مقاله سعی شده است تا پاسخ گذرای مبدل های حرارتی قاب و صفحه با منظور کردن دو اثر فوق الذکر بررسی گردد. مقایسه ای نیز میان پاسخ بدست آمده با پاسخ حالت خواص ثابت و توزیع یکنواخت جریان انجام شده است.

### معادلات حاکم بر مسئله

فرضیات زیر را در مدلسازی مسئله در نظر می گیریم:

- ۱- بجز ویسکوزیته، سایرخواص سیال ثابت فرض شده اند. تغییرات ویسکوزیته تابع تغییرات درجه حرارت فرض شده است. سیالات تراکم ناپذیرند.
- ۲- درجه حرارت سیال و دیواره، تابعی است از  $t$  (زمان) و  $x$  (مکان - در امتداد طول کانال). توزیع درجه حرارت در عرض کانال (عمود بر امتداد جریان) ناچیز فرض شده است.
- ۳- انتقال حرارت میان مبدل و محیط اطراف ناچیز فرض شده است.

$$i = 2, 4, 6, \dots, 2\left[\frac{N}{2}\right]$$

$$\rho_w C_w \frac{\partial T_{wi}}{\partial t} = \frac{h_2}{W_w} (T_{i-1} - T_{wi}) + \frac{h_1}{W_w} (T_i - T_{wi})$$

$$i = 3, 5, 7, \dots, 2\left[\frac{N}{2}\right] - 1$$

$$\rho_w C_w \frac{\partial T_{w1}}{\partial t} = \frac{h_1}{W_w} (T_1 - T_{w1})$$

$$\rho_w C_w \frac{\partial T_{wN}}{\partial t} = \frac{h_2}{W_w} (T_N - T_{wN+1})$$

(۶)

با استفاده از متغیر های زیر معادلات فوق بی بعد می شوند:

$$X = x / L \quad \text{مکان بی بعد} \quad (۷)$$

$$Z = tV_{in} / L \quad \text{زمان بی بعد} \quad (۸)$$

$$\theta = \frac{T - T_{in,cold}}{T_{in,hot} - T_{in,cold}} \quad \text{دمای بی بعد} \quad (۹)$$

$$u_r = u / V_{in}$$

$$\beta = \frac{hL}{\rho C W_c V_{in}}$$

$$\gamma = \frac{L}{\rho C W_w V_{in}}$$

(۱۰)

در نتیجه معادلات بی بعد عبارتند از:

$$\frac{\partial \theta_i}{\partial Z} = u_r \frac{\partial \theta_i}{\partial X} + \beta (\theta_{wi} + \theta_{wi+1} - 2\theta_i)$$

$$i = 1, 2, 3, 4, 5, \dots, N$$

$$\frac{\partial \theta_{wi}}{\partial Z} = \gamma h_1 (\theta_{i-1} - \theta_{wi}) + \gamma h_2 (\theta_i - \theta_{wi})$$

$$i = 2, 3, 4, 5, \dots, N$$

$$\frac{\partial \theta_{w1}}{\partial Z} = \gamma h_1 (\theta_1 - \theta_{w1})$$

$$\frac{\partial \theta_{wN}}{\partial Z} = \gamma h_2 (\theta_N - \theta_{wN+1})$$

(۱۱)

شرایط مرزی انتقال حرارت عبارتند از:  
در  $X = 0$

$$\theta_i = f(Z) \quad i = 1, 3, 5, \dots, 2\left[\frac{N}{2}\right] - 1$$

$$\frac{\partial \theta_i}{\partial X} = 0 \quad i = 2, 4, 6, \dots, 2\left[\frac{N}{2}\right]$$

(۱۲)

جریان آرام و مغشوش از روابط زیر بدست می آیند.  
برای هدر:

$$f = \frac{32}{Re} \quad \text{جریان آرام [۷]} \quad (۲)$$

$$f = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad \text{جریان مغشوش [۷]} \quad (۳)$$

برای کانال:

$$f = \frac{32}{Re} \quad \text{در جریان آرام [۸]} \quad (۴)$$

$$f = \frac{1.17}{Re^{0.27}} \quad \text{در جریان مغشوش [۸]} \quad (۵)$$

با نوشتن روابط پیوستگی و افت فشار برای هر گره نهایتاً یک دستگاه معادلات غیر خطی بدست می آید که با استفاده از روش نیوتن - رافسون حل می شود. روابط افت فشار برای مبدل های U و Z یکسان است ولی روابط پیوستگی برای این دو نوع مبدل متفاوت می باشد. کلیه دبی ها بجز دبی ورودی و فشار کلیه گره ها مجهول می باشند معلومات مسئله دبی و فشار ورودی می باشند. برنامه نویسی جهت حل دستگاه معادلات غیر خطی در محیط نرم افزار Fortran 90 انجام شده است. خروجی این برنامه شامل سرعت سیال در هر کانال و هر قسمت از هدر میان دو کانال، افت فشار مبدل و مدت زمان تأخیر سیال در ورود به هر کانال است.

### معادلات انتقال حرارت

معادلات انتقال حرارت حاکم بر یک مبدل قاب و صفحه عبارتند از [۱۰]:

$$\rho_1 C_1 \frac{\partial T_i}{\partial t} = -\rho_1 C_1 u_i \frac{\partial T_i}{\partial x} + \frac{h_1}{W_c} (T_{wi} + T_{wi+1} - 2T_i)$$

$$i = 1, 3, 5, \dots, 2\left[\frac{N}{2}\right] - 1$$

$$\rho_2 C_2 \frac{\partial T_i}{\partial t} = +\rho_2 C_2 u_i \frac{\partial T_i}{\partial x} + \frac{h_2}{W_c} (T_{wi} + T_{wi+1} - 2T_i)$$

$$i = 2, 4, 6, \dots, 2\left[\frac{N}{2}\right]$$

$$\rho_w C_w \frac{\partial T_{wi}}{\partial t} = \frac{h_1}{W_w} (T_{i-1} - T_{wi}) + \frac{h_2}{W_w} (T_i - T_{wi})$$

که در آن خواص سیال ثابت منظور شده است و توزیع سرعت نیز میان کانال های مبدل یکسان در نظر گرفته شده است. مدل دوم: که در آن تغییرات ویسکوزیته و توزیع نابرابر جریان در مبدل منظور شده است. مدل اول را به اختصار مدل ثابت و مدل دوم را مدل متغیر می نامیم.

پاسخ گذرای مبدل های حرارتی با اعمال ورودی پله ای به سیستم بررسی شده است. در شرایط پایدار حرارتی اولیه مبدل، درجه حرارت کلیه نقاط معادل 300K منظور شده است. ورودی پله ای به سمت گرم مبدل وارد شده و بصورت پله ای ای ای شبیه سازی شده که در مدت زمان 0.1 ثانیه با طی مسیر یک منحنی درجه سوم، به مکان اوج خود، 350K می رسد.

### مقایسه توزیع نابرابر جریان در مبدل های U و Z

نتایج حاصل از حل دسته معادلات غیر خطی جریان در مبدل های U و Z در شکل های (۲) تا (۴) آمده است. چنانکه در این شکل ها مشاهده می شود:

الف- اختلاف کمترین و بیشترین سرعت کانال در مبدل های Z همواره کمتر از مبدل های U است. عبارت دیگر می توان گفت که مبدل های Z پروفیل سرعت یکنواخت تری را نسبت به مبدل های U بدست می دهند و توزیع نا برابر جریان در مبدل های U بیشتر از مبدل های Z است.

ب- توزیع نابرابر جریان با افزایش تعداد کانال ها و در دبی های ورودی یکسان، خصوصاً در مبدل های U، بارزتر می شود.

ج- با افزایش دبی در یک مبدل حرارتی قاب و صفحه اثرات توزیع نابرابر جریان تشدید می شود.

منحنی شکل (۵) نمایش دهنده تغییرات افت فشار بر حسب افزایش تعداد کانالها در مبدل های U و Z است. این شکل گویای آنست که اولاً مبدل های Z همواره افت فشار بیشتری نسبت به مبدل های U دارند، خصوصاً برای تعداد کانال های کمتر افت فشار مبدل Z بسیار بیشتر از مبدل U است، و ثانیاً با افزایش تعداد کانالهای یک مبدل حرارتی قاب و صفحه در دبی ثابت، از افت فشار مبدل کاسته می شود ولی با افزایش هرچه بیشتر تعداد کانال ها از سیر نزولی افت فشار کاسته می شود.

در  $X = 1$ :

$$\theta_i = f(Z) \quad i = 2, 4, 6, \dots, 2\left[\frac{N}{2}\right]$$

$$i = 1, 3, 5, \dots, 2\left[\frac{N}{2}\right] - 1 \quad \frac{\partial \theta_i}{\partial X} = 0$$

(۱۳)

مقدار  $h$  ضریب جابجایی حرارتی، برای جریان های آرام و مغشوش با استفاده از اعداد نوسلت زیر محاسبه می شود [۸]:  
برای جریان آرام<sup>۱</sup>

$$Nu = 0.2(\text{Re})^{0.67}(\text{Pr})^{0.4}\left(\frac{\eta}{\eta_w}\right)^{0.1}$$

(۱۴)

برای جریان درهم<sup>۲</sup>

$$Nu = 0.2(\text{Re Pr})^{0.4}\left(\frac{\eta}{\eta_w}\right)^{0.1}$$

(۱۵)

مقدار ویسکوزیته در روابط فوق در هر لحظه بر اساس مقدار درجه حرارت محاسبه شده برای سیال در لحظه قبل،  $t - \Delta t$  به میزان کافی کوچک انتخاب شده است)، محاسبه شده و درجه حرارت در زمان حال بر اساس آن محاسبه می شود. مطابق درجه حرارت بدست آمده در زمان حال مقدار ویسکوزیته مجدداً محاسبه می شود. این روند تا همگرا شدن محاسبه مقادیر درجه حرارت و ویسکوزیته ادامه می یابد. معادلات انتقال حرارت با استفاده از روش تفاضل محدود backward و forward به ترتیب برای کانال های فرد و زوج، و از روش explicit حل شده اند.

### ارائه نتایج

#### مدل مورد استفاده

مبدلی با مشخصات هندسی زیر جهت مدلسازی مورد استفاده قرار گرفته است:

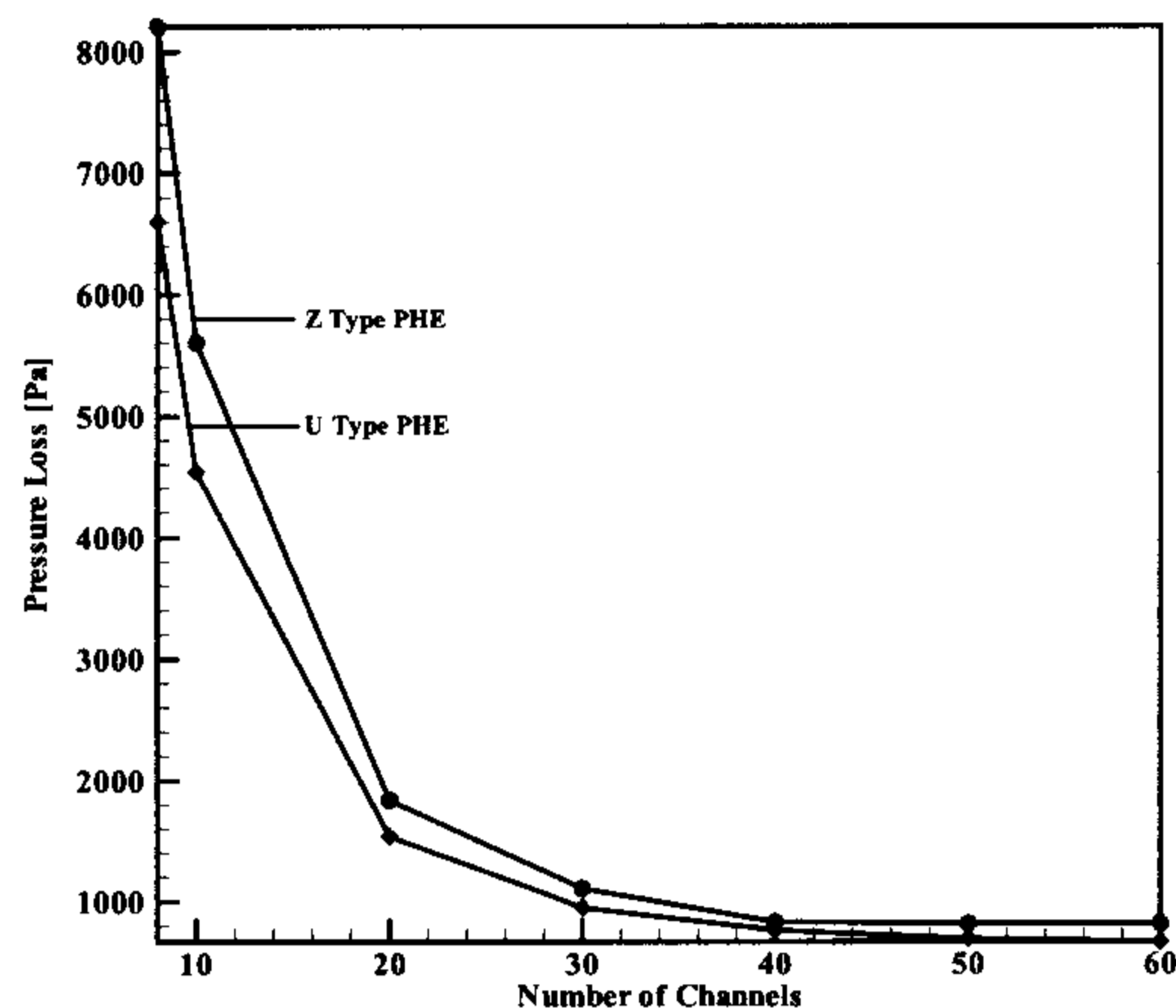
طول کانال : 0.8 m

عرض کانال : 0.3 m

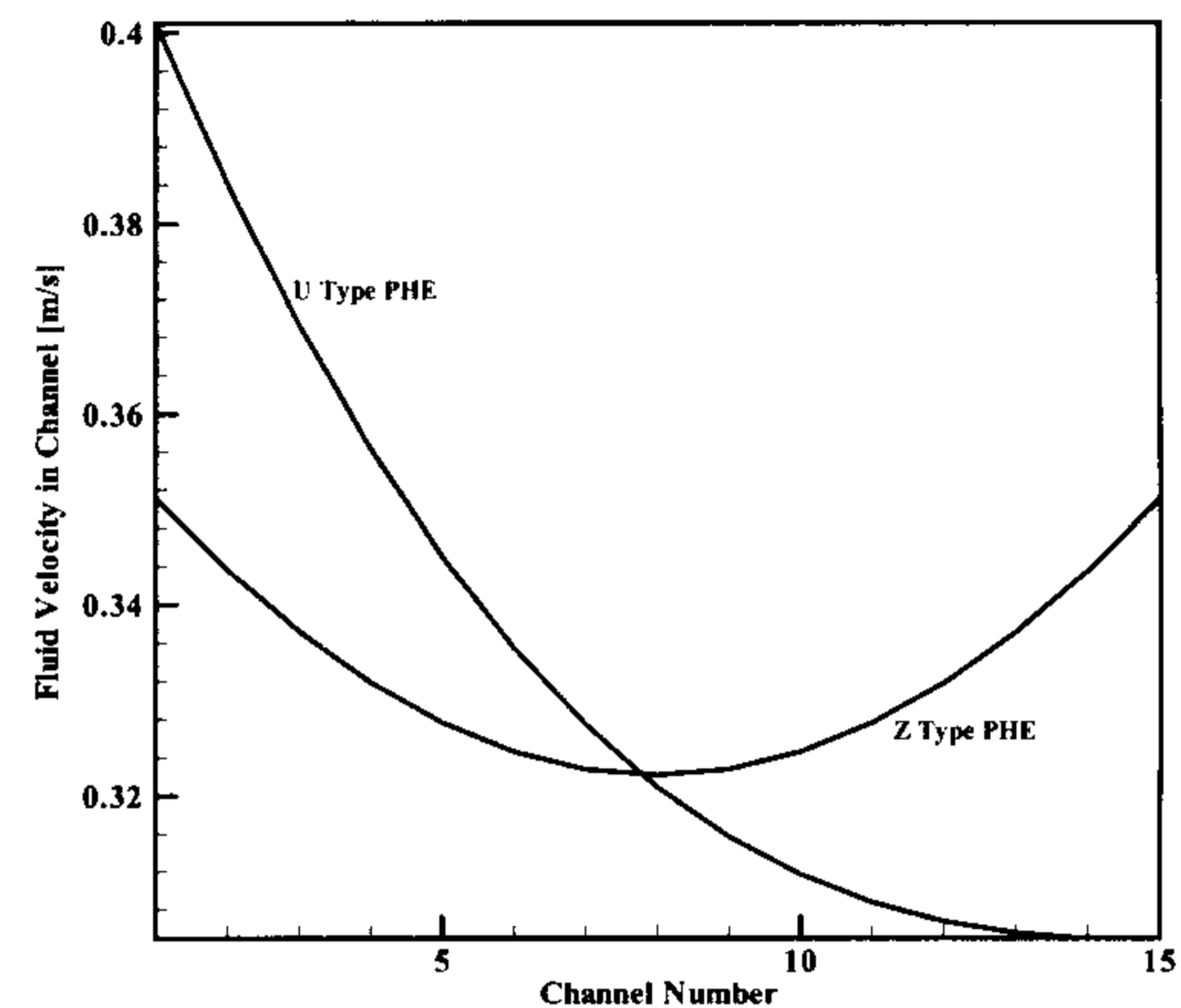
ضخامت کانال : 4.0 mm

ضخامت دیواره : 1.0 mm

سیال مورد استفاده در مدلسازی آب است. انتقال حرارت در مبدل های حرارتی قاب و صفحه در این مقاله در قالب دو مدل شبیه سازی شده است. مدل اول:



شکل ۵: مقایسه افت فشار مبدل های U و Z، تعداد کانال ها: 8 تا 60 عدد، دبی ورودی 6.0 kg/s.



شکل ۲: مقایسه شکل توزیع نابرابر سرعت در کانالهای مبدل های U و Z برای دبی ورودی 6.0 kg/s و 15 کانال.

### بررسی انتقال حرارت گذرا در مبدل های حرارتی U با تحریک پله ای

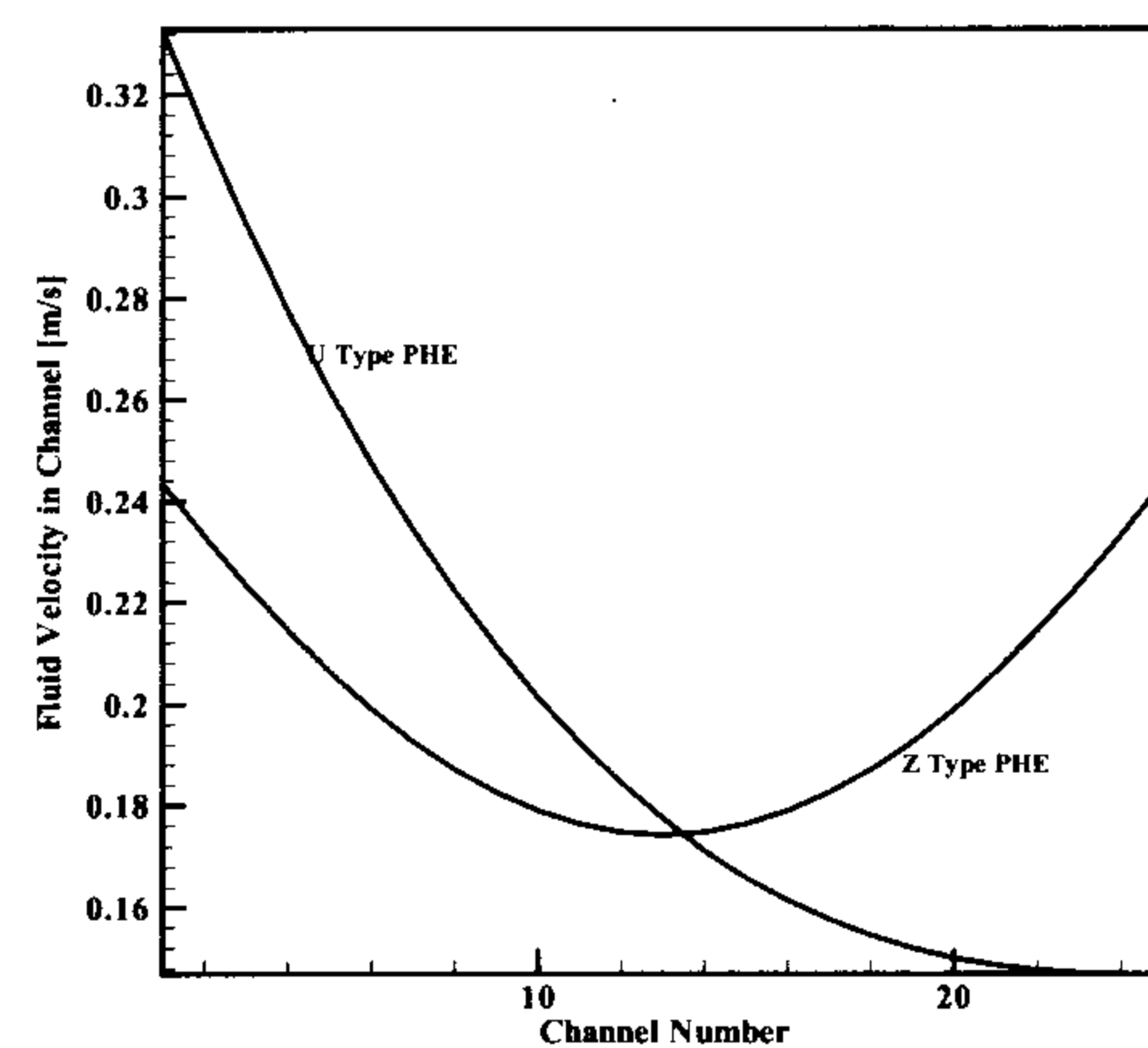
در این بخش پاسخ گذرای مبدل های حرارتی U با اعمال شرط اولیه برای سمت گرم (کانال های زوج) بررسی می شوند. در اینجا اثر افزایش دبی و نیز افزایش تعداد کانال ها در دبی ورودی ثابت بر پاسخ گذرای مبدل های حرارتی قاب و صفحه بررسی می شود. در ضمن پاسخ بدست آمده از مدل های ثابت و متغیر نیز مقایسه می گردد.

تغییرات ویسکوزیته و توزیع نابرابر جریان در مبدل های حرارتی قاب و صفحه باعث تفاوت ضریب جابجایی حرارتی در کانال های مبدل می شوند که متقابلاً بر انتقال حرارت در مبدل اثر می گذارند. دلیل این امر را در دو مورد خلاصه می کنیم:

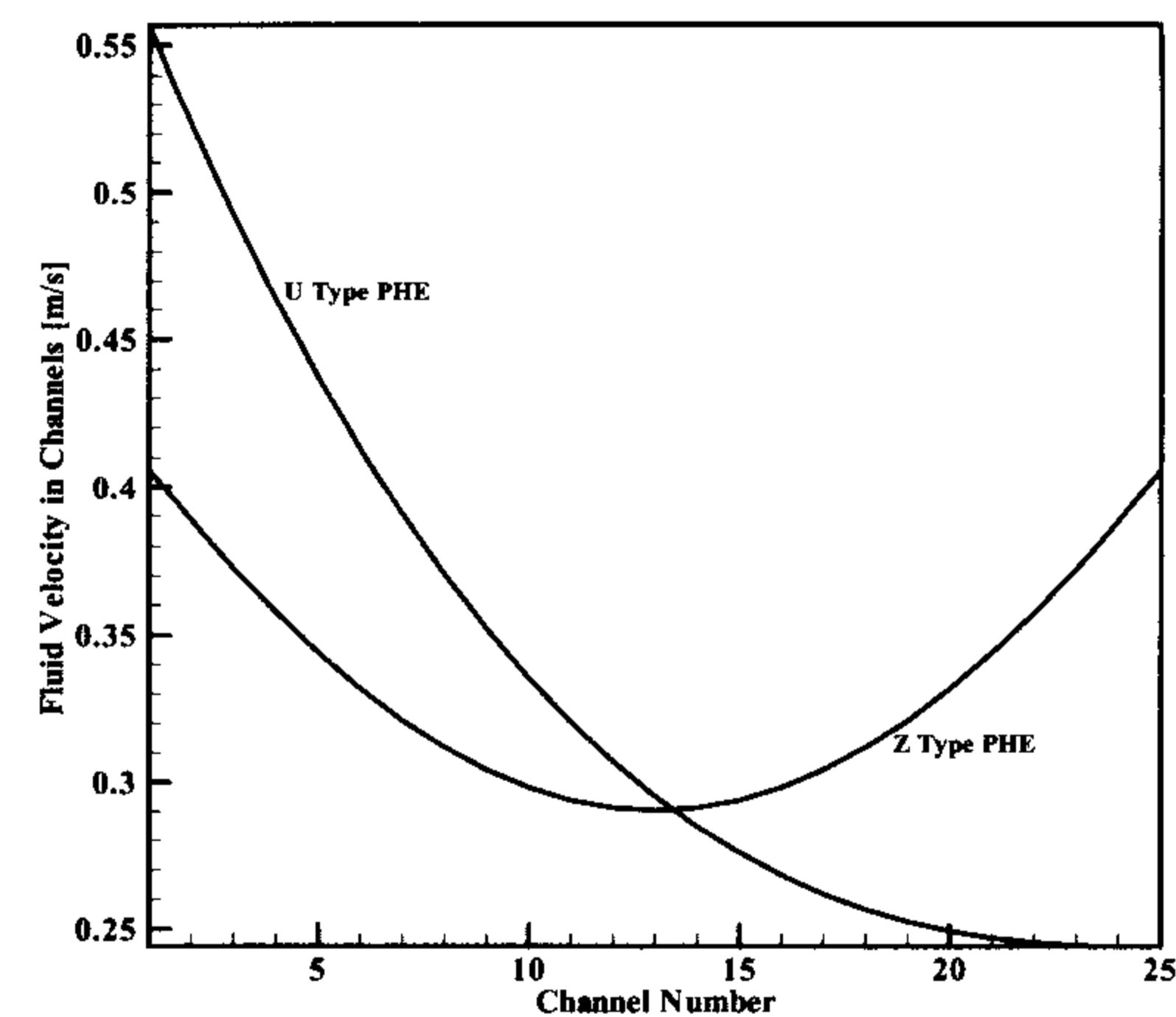
الف- تبعیت مقدار ضریب جابجایی از مقدار سرعت در کانال و وجود توزیع نابرابر جریان در مبدل که باعث تفاوت مقدار ضریب جابجایی حرارتی در هر کانال نسبت به کانال دیگر می شود. مقدار ضریب حرارتی جابجایی مستقیماً در معادلات انتقال حرارت ظاهر می گردد.

ب- تغییر مقدار ویسکوزیته در هر مکان مطابق با تغییرات درجه حرارت، که متقابلاً مقدار عدد نوسلت و ضریب جابجایی را تحت تأثیر قرار می دهد.

در شکل (۶) که نمایش دهنده درجه حرارت خروجی مبدل است تفاوت پاسخ مدل ثابت با مدل متغیر مشاهده می شود. بازدهی حرارتی مبدل در این دو حالت به ترتیب برابر 38.5% و 37.9% می باشد، که همانطور که در شکل



شکل ۳: مقایسه شکل توزیع نابرابر سرعت در کانالهای مبدل های U و Z برای دبی ورودی 6.0 Kg/s و 25 کانال.



شکل ۴: مقایسه شکل توزیع نابرابر سرعت در کانالهای مبدل های U و Z برای دبی ورودی 10 kg/s و 25 کانال.

ثابت نگهداشته شده و دبی ورودی افزایش داده می شود و سپس دبی ورودی ثابت منظور شده و تعداد کانال ها افزایش می یابد. نتایج مقایسه مرحله اول در شکل های (۸) و (۹) و نتایج مقایسه مرحله دوم در شکل های (۱۰) و (۱۱) آورده شده اند.

در مرحله اول تعداد کانال های مبدل به ترتیب 10، 30 و دبی های ورودی به ترتیب 3.0، 4.0 و 5.0 kg/s می باشد. در شکل های (۸) و (۹) مشاهده می شود که:

الف- با افزایش دبی ورودی، برای مبدل هایی با تعداد کانال های برابر از میزان حرارت مبادله شده و متقابلاً از مقدار بازدهی حرارتی مبدل کاسته می شود. دلیل این امر افزایش سرعت سیال در کانال های مبدل است که علاوه بر کاهش مقدار ضریب کلی انتقال حرارت [۹] (رجوع کنید به جدول الف) کاهش مدت زمان انتقال حرارت را نیز سبب می شود.

ب- مدت زمان رسیدن به حالت پایدار با ازدیاد تعداد کانال ها به شدت افزایش می یابد.

ج- در دبی های برابر، مقدار بازدهی حرارتی مبدل دارای تعداد کانال های بیشتر، بیشتر است.

شکل های (۱۰) و (۱۱)، همانطور که اشاره شد، مقایسه ای است میان پاسخ های سمت سرد و گرم مبدل های حرارتی U دارای 10، 20، 30، 40، 50 و 60 کانال با دبی ورودی یکسان و معادل 6.0 kg/s و برای مدل متغیر. نکات جالب توجه در این دو شکل به شرح زیر می باشند:

الف- با افزایش تعداد کانال ها و دبی ورودی ثابت، مدت زمان حصول حالت پایدار در مبدل افزایش می یابد.

ب- با افزایش تعداد کانال ها و دبی ورودی ثابت، آغاز پاسخ زمانی سمت گرم، (سمتی که توسط ورودی پله ای ای تحریک شده است) دچار تأخیر می شود. در اینجاست که اثرات توزیع نابرابر جریان در مبدل آشکار می شود. همانطور که در بخش مقایسه توزیع نابرابر جریان، و طی شکل های (۶) و (۷) نمایش داده شد، اثرات توزیع نابرابر جریان برای مبدل های U در حالت افزایش تعداد کانال ها و ثابت نگهداشتن دبی های ورودی تشدید می شود. اینک اثر این توزیع نابرابر بر انتقال حرارت در مبدل، در شکل های (۱۰) و (۱۱) بصورت بروز

نیز مشاهده می شود، بازدهی حرارتی مدل ثابت بیشتر است. نکته دیگری که در این شکل می توان دید سریعتر بودن پاسخ مدل ثابت برای سمت سرد و کندتر بودن آن برای سمت گرم است در مقایسه با پاسخ مدل متغیر. دیگر مشخصات محاسبه شده برای این دو مدل عبارتند از:

$$LMTD=0.615$$

$$NTU=0.62$$

$$U=4563 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$\varepsilon = \frac{C_{hot}(T_{in} - T_{out})}{C_{min}(T_{in} - t_{in})} = \frac{C_{cold}(t_{out} - t_{in})}{C_{min}(T_{in} - t_{in})}$$

- مدل متغیر:

$$LMTD=0.620$$

$$NTU=0.61$$

$$U=4678 \text{ W/m}^2\text{K}$$

می توان نشان داد که تغییرات ویسکوزیته و توزیع نابرابر جریان باعث تفاوت پاسخ گذرای هر کانال مبدل حرارتی قاب و صفحه نسبت به کانال دیگر می شود [۱۱].

در ادامه بحث اثر افزایش تعداد کانال ها را بر انتقال حرارت گذرا بررسی و مقایسه می کنیم. اما پیش از آن باید نکته ای در مورد محدوده افزایش تعداد کانال ها ذکر گردد. مطابق تحقیقات Lakshmanan و Potter [۵]، درجه حرارت خروجی یک مبدل حرارتی قاب و صفحه با افزایش تعداد کانال ها نهایتاً از مقدار ثابتی بیشتر نخواهد شد. در شکل (۷) درجه حرارت حالت پایدار سمت سرد و گرم مبدل U در دبی ثابت و در حالت افزایش تعداد کانال ها ترسیم شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می شود شیب منحنی پاسخ سمت سرد و گرم با افزایش تعداد کانال ها کاهش می یابد.

شکل (۷) نشان می دهد که با افزایش تعداد کانال ها در دبی ثابت، بر میزان انتقال حرارت افزوده می شود بدین معنی که سمت سرد مبدل گرمتر و سمت سرد مبدل سردتر از حالت تعداد کمتر کانال ها می شود. در اینجاست که بازدهی حرارتی مبدل و نیز مقدار NTU افزایش چشمگیری می یابد (رجوع کنید به جدول الف).

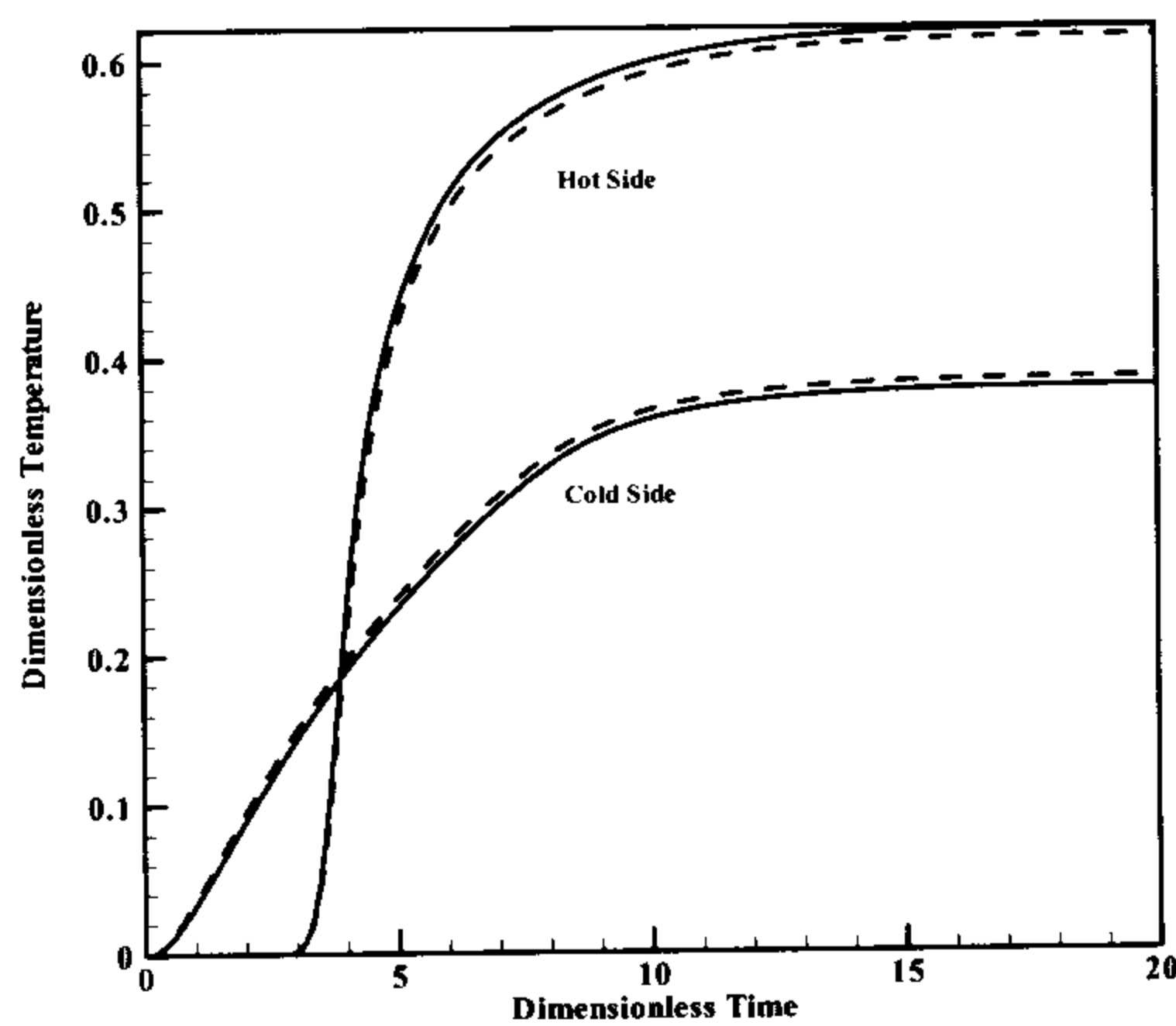
در این مرحله مقایسه ای میان پاسخ حالت گذرای مبدل حرارتی U و بازدهی آن در دبی های متفاوت ورودی و برای مدل متغیر انجام می دهیم. این مقایسه در دو مرحله انجام می گیرد. ابتدا تعداد کانال ها

الف- با افزایش تعداد کانال ها اختلاف درجه حرارت حالت پایدار بدست آمده از دو مدل ثابت و متغیر رو به فزونی است.

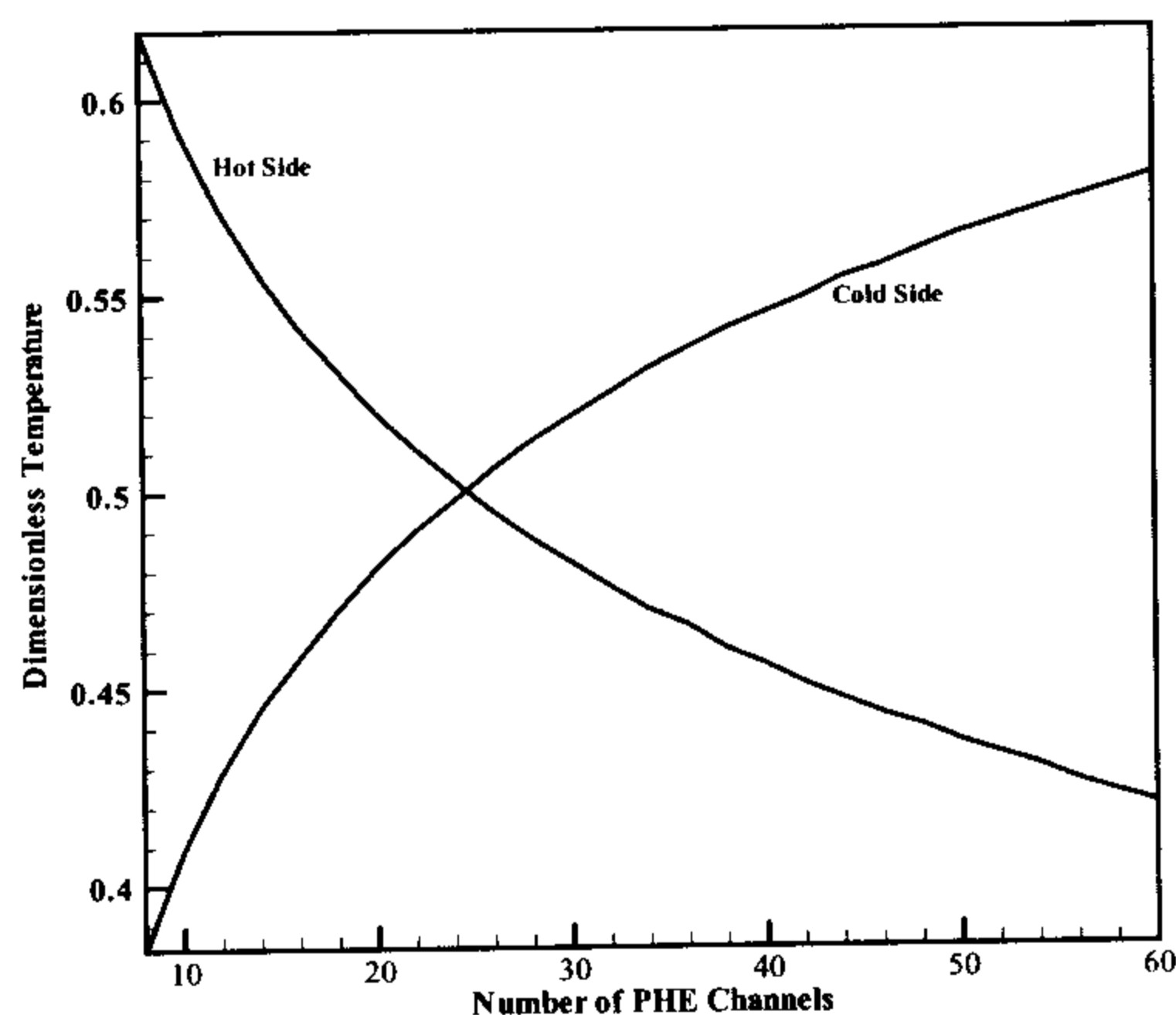
ب- با افزایش تعداد کانال ها پاسخ سمت تحریک شده توسط تابع پله ای ای برای مدل متغیر دچار نوسان می شود در حالیکه این حالت برای مدل ثابت و نیز برای مبدلی با تعداد کانال های کمتر ظاهر نمی شود.

ج- با افزایش تعداد کانال ها سمت تحریک شده توسط تابع پله ای ای برای مدل متغیر سریعتر از مدل ثابت نسبت به تحریک مزبور عکس العمل نشان می دهد. (اثر توزیع نابرابر جریان بر انتقال حرارت در مبدل هایی با تعداد کانال های بیشتر، مشهودتر است).

در جدول الف مشخصات حالت پایدار مبدل های U برای پاسخ پله ای آورده شده اند.



شکل ۶: نمودار های درجه حرارت سرد و گرم خروجی یک مبدل حرارتی U دارای 8 کانال، (---: مدل ثابت) و (-:-: مدل متغیر)، دبی ورودی سمت سرد و گرم 6.0 kg/s، مدل متغیر.



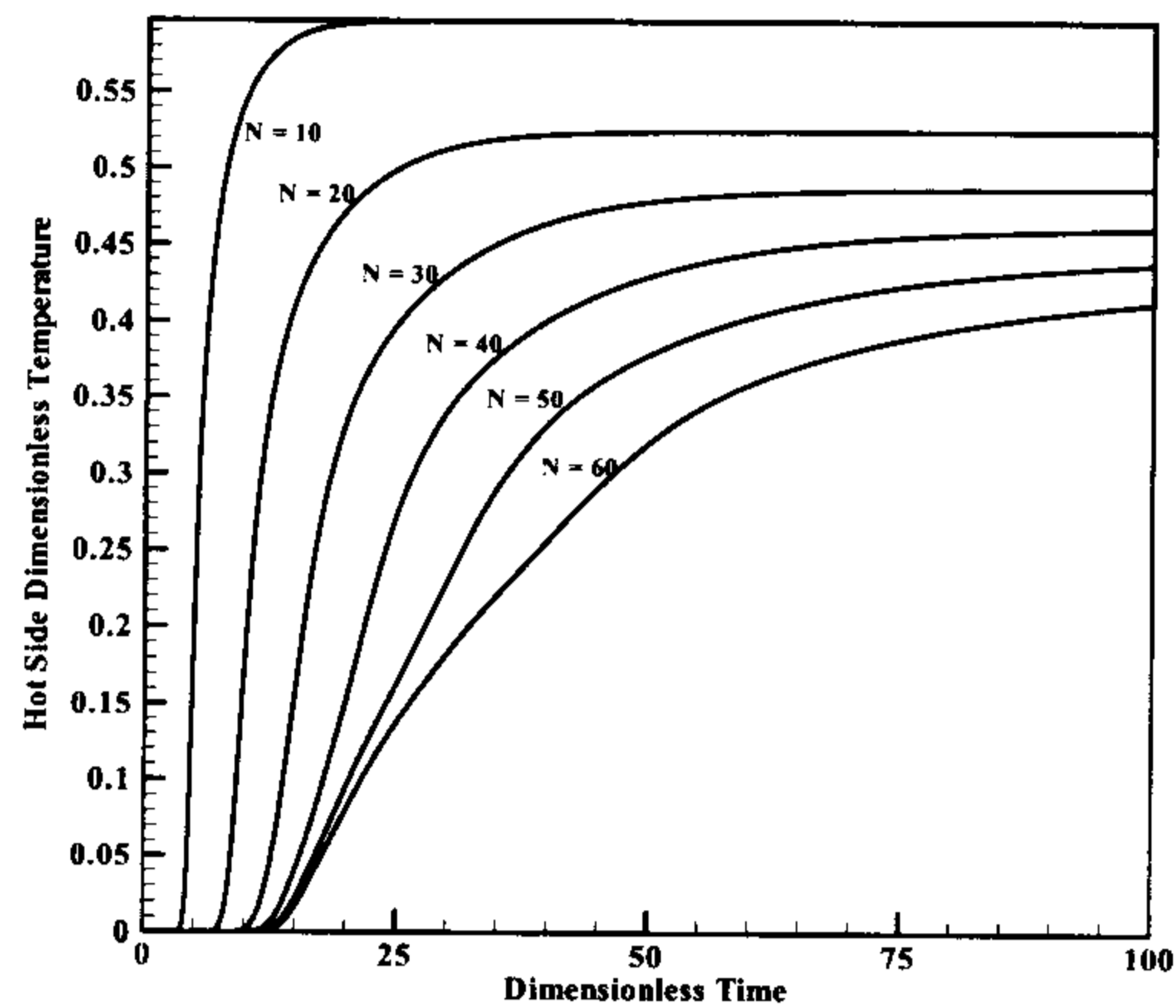
شکل ۷: نمایش اثر افزایش تعداد کانال ها بر درجه حرارت پایدار خروجی کانال های سرد و گرم مبدل حرارتی U، مدل متغیر، دبی ورودی 6.0 kg/s

تأخیر در پاسخ سمت تحریک شده ظاهر می شود. ج- با افزایش تعداد کانال ها و دبی ورودی ثابت، بر میزان انتقال حرارت میان سیالات سرد و گرم افزوده شده، درجه حرارت سمت سرد افزایش و درجه حرارت سمت گرم کاهش می یابد. متعاقباً بر مقدار بازدهی حرارتی مبدل نیز افزوده می شود.

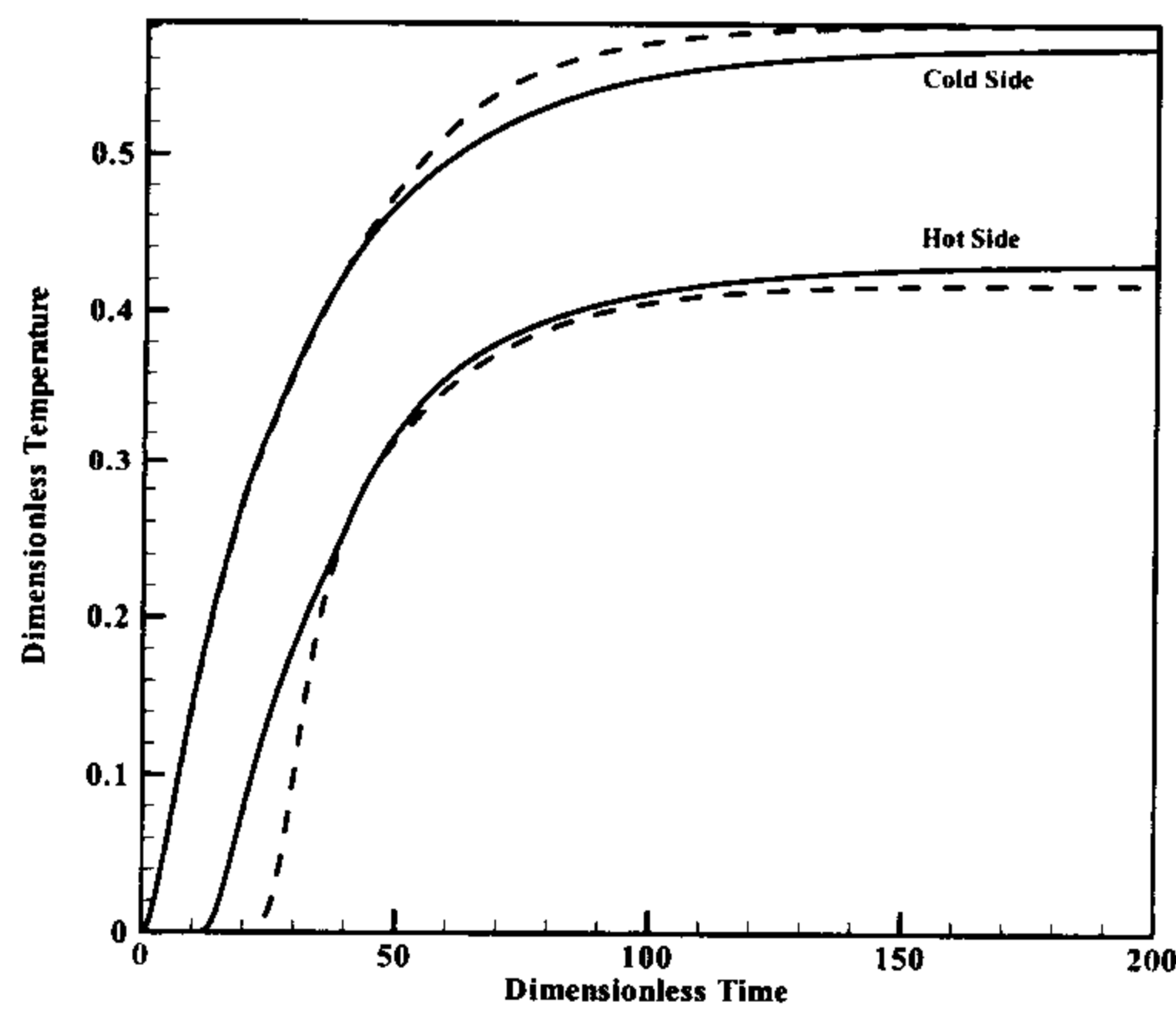
د- با افزایش تعداد کانال ها و دبی ورودی ثابت، پاسخ سمت گرم، (سمت تحریک شده) در هنگام اوج گیری دچار نوسان می گردد در صورتی که این امر در مورد سیال سرد که تحریک نشده است مشاهده نمی شود. این پدیده که توسط Roetzel و Das [۶] نیز مشاهده شده است بدلیل توزیع نابرابر جریان در مبدل و نیز وجود اختلاف زمانی در ورود سیال به کانال ها رخ می دهد و اثرات آن با افزایش تعداد کانال ها تشدید می شود.

قابلیت افزودن بر تعداد کانال های مبدل های حرارتی قاب و صفحه همواره بعنوان انعطاف پذیری این نوع از مبدل ها یاد شده و نیز از مزایای بارز آن شمرده می شود. در نظر اول ممکن است این تصور پیش آید که با افزودن بر تعداد کانال های یک مبدل حرارتی قاب و صفحه بر مقدار افت فشار آن نیز افزوده شده و ممکن است پمپ تغذیه کننده سیستم را دچار اشکال کند. شکل (۱۲) نشانگر آنست که افزایش تعداد کانال ها در دبی ثابت از مقدار افت فشار مبدل، خصوصاً مبدل دارای تعداد کانال های کم، به میزان قابل توجهی می کاهد. چنانکه در شکل (۷) و نیز شکل های (۱۰) و (۱۱) مشاهده می شود با افزایش تعداد کانال های مبدل در دبی ثابت می توان به وظایف حرارتی مطلوب تری دست یافت. لذا در تغییر فرایندی که نیاز به تبادل حرارت بیشتری توسط مبدل در دبی فعلی، یا تغییر جزئی در دبی فعلی، باشد می توان بدون نگرانی از ضعف پمپ تغذیه کننده سیستم بر تعداد کانال های مبدل افزود. تنها باید این نکته را در نظر داشت که افزایش هرچه بیشتر صفحات (کانال ها) بیش از یک مقدار معین اقتصادی نمی باشد چون اثری بر درجه حرارت خروجی سیالات نخواهد داشت.

شکل (۱۲) مقایسه ای است میان پاسخ مدل ثابت و متغیر برای مبدل U شکل با 60 کانال. همانطور که مشاهده می شود پاسخ مدل ثابت فاقد نوساناتی است که در مدل متغیر مشاهده می شود. از مقایسه این شکل با شکل (۶) چنین بر می آید که:



شکل ۱۱: مقایسه درجه حرارت های حالت گذرای سمت گرم، مدل متغیر، دبی ورودی سمت سرد و گرم =  $6.0 \text{ kg/s}$  مبدل های حرارتی U شامل 10، 20، 30، 40، 50 و 60 کانال.

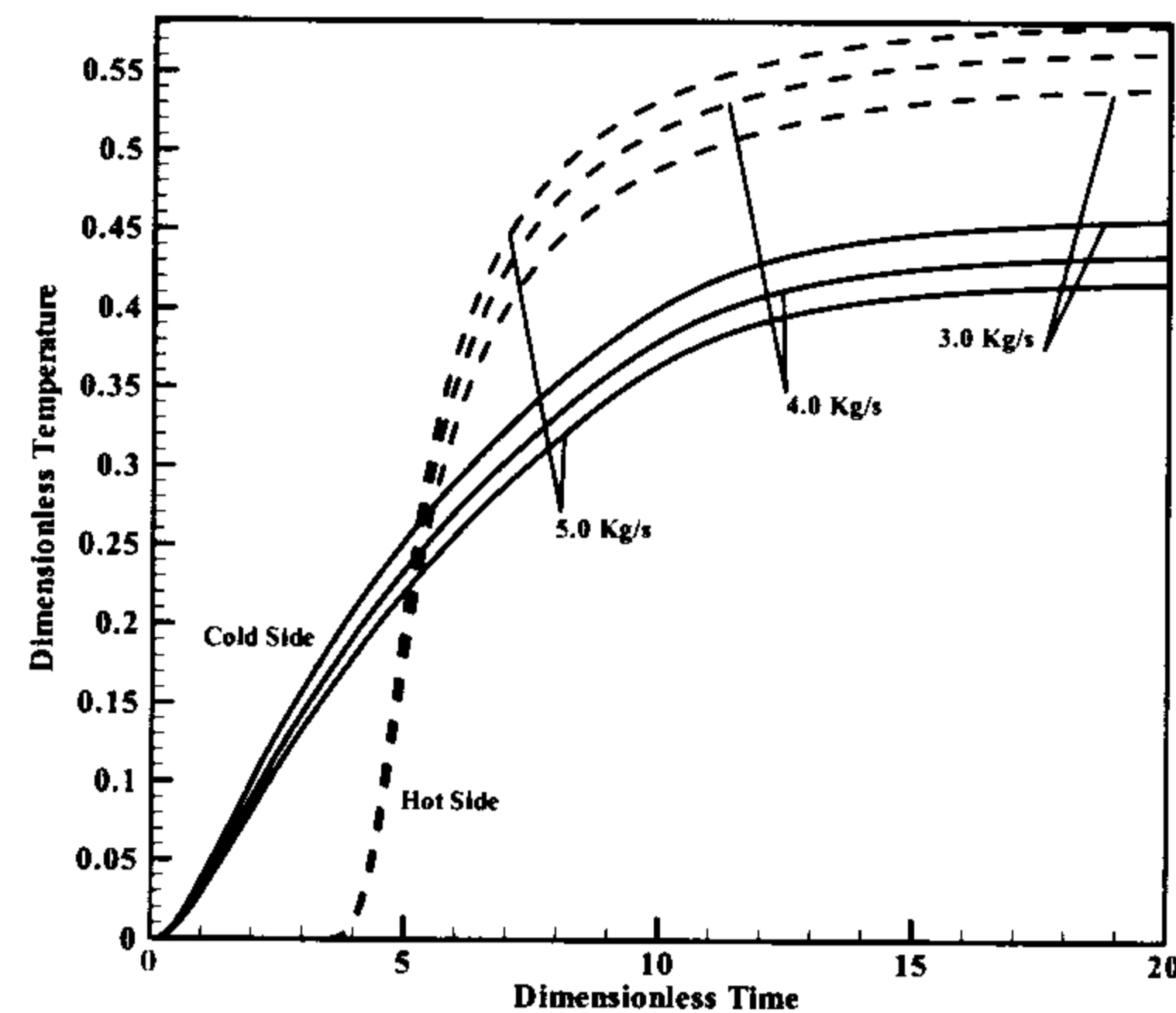


شکل ۱۲: درجه حرارت های حالت گذرای سمت سرد و گرم مبدل حرارتی U دارای 60 کانال (- -) مدل ثابت، (-) مدل متغیر، دبی ورودی سمت سرد و گرم =  $6.0 \text{ Kg/s}$ .

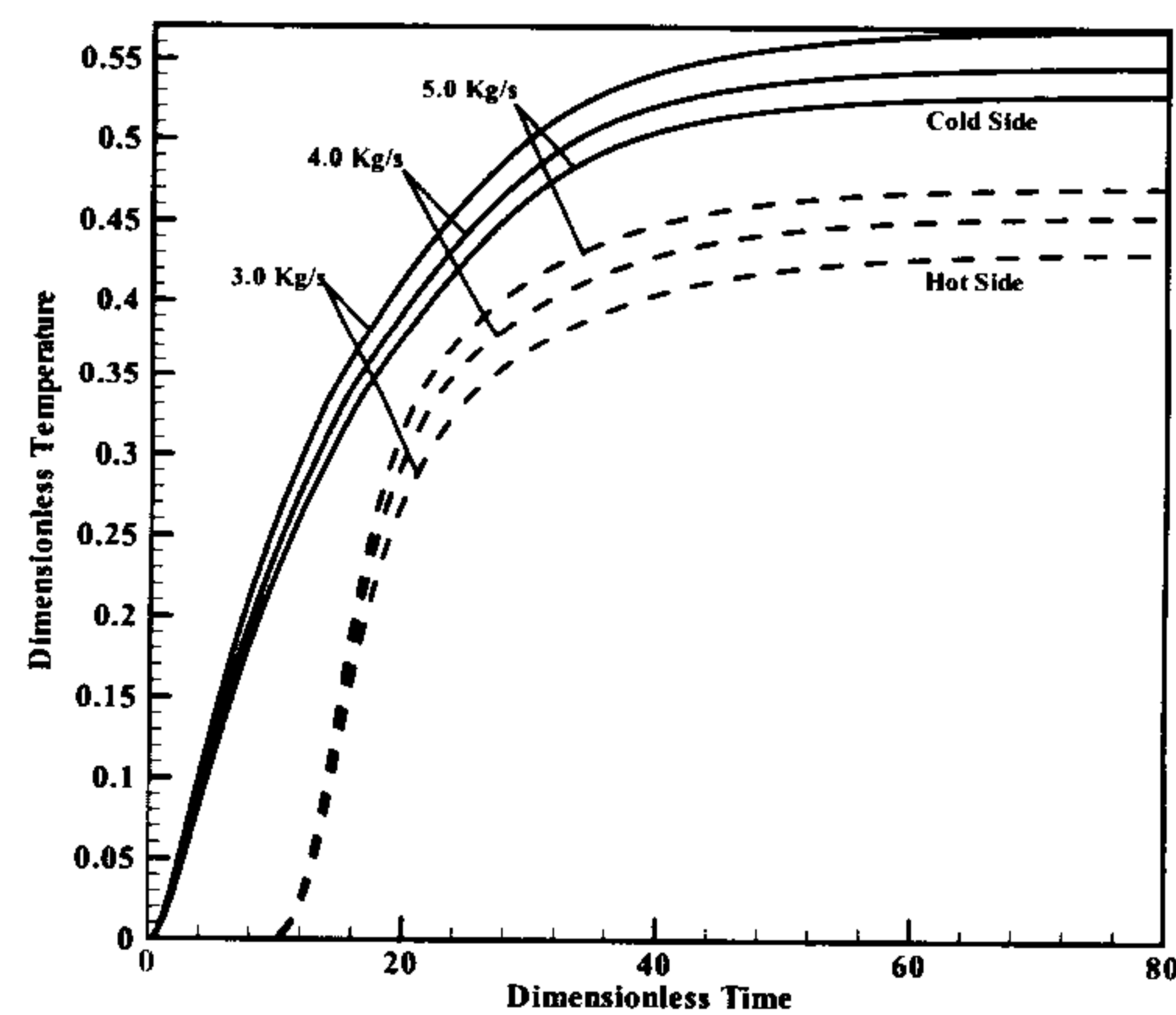
### مقایسه انتقال حرارت در مبدلهای U و Z با شرایط اولیه پله ای

در مورد انتقال حرارت در مبدل های Z بطور جداگانه بحث نمی شود بلکه آنرا در غالب مقایسه با مبدلهای U ارائه می دهیم تا مستقیماً تفاوت ها و شباهتهای پاسخ حالت گذرای این دو مورد بررسی قرار گیرد.

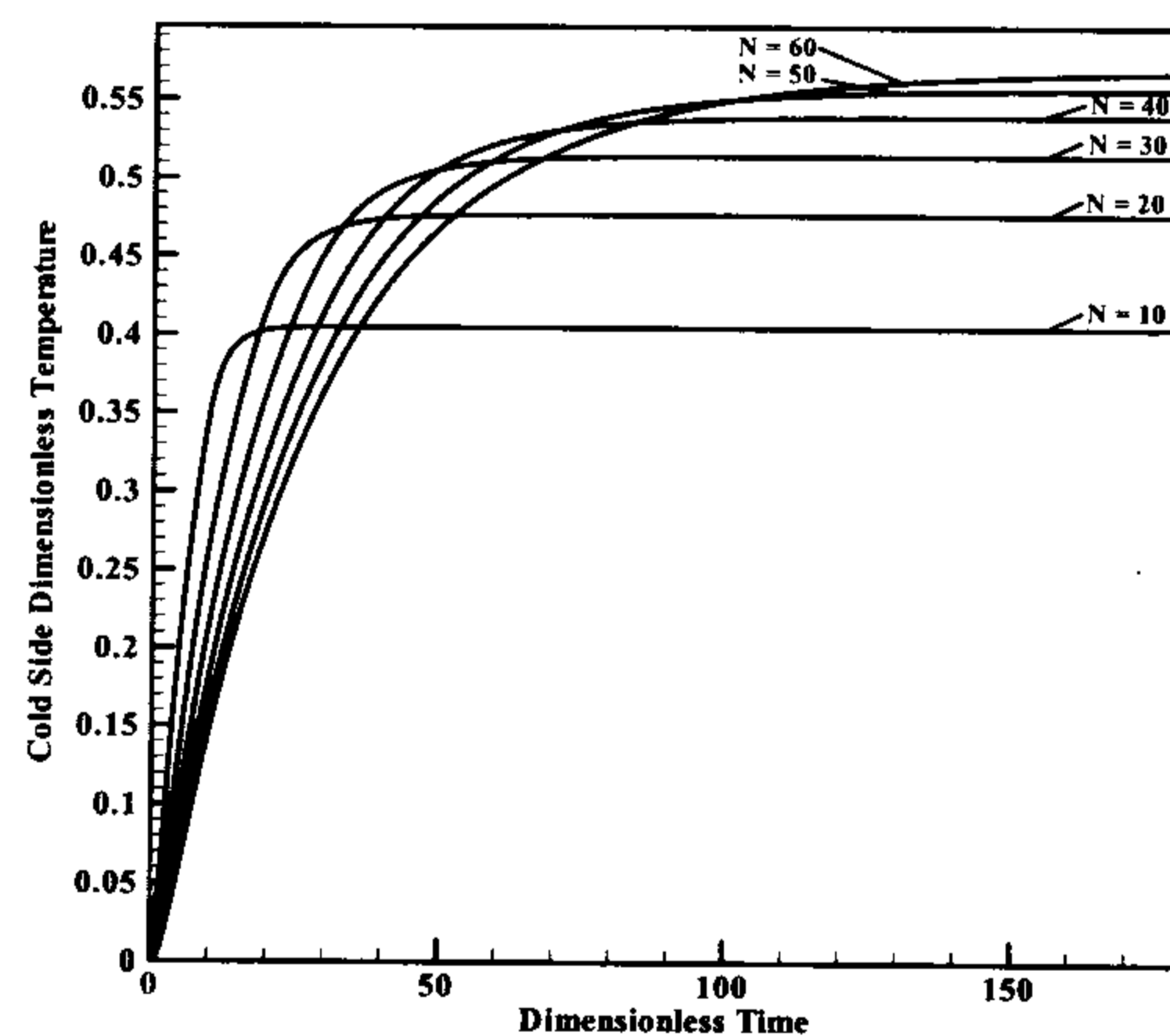
در شکل (۱۳) و (۱۴) پاسخ گذرای مبدل های U و Z دارای 40 و 60 کانال و دبی ورودی سمت سرد و گرم معادل  $6.0 \text{ Kg/s}$  رسم شده است. مدل استفاده شده مدل متغیر می باشد. شکل های (۱۳) و (۱۴) گویای این هستند که:



شکل ۸: درجه حرارت حالت گذرای مبدل حرارتی U دارای 10 کانال، مدل متغیر، (- -) سمت گرم، (-) سمت سرد دبی ورودی: 3.0، 4.0، 5.0  $\text{kg/s}$ ، بازدهی به ترتیب: 45.8%، 43.6% و 41.8%.



شکل ۹: درجه حرارت حالت گذرای مبدل حرارتی U دارای 30 کانال، مدل متغیر، (- -) سمت گرم، (-) سمت سرد دبی ورودی: 3.0، 4.0، 5.0  $\text{kg/s}$ ، بازدهی به ترتیب برابر 56.8%، 55.0% و 53.0%.



شکل ۱۰: مقایسه درجه حرارت های حالت گذرای سمت گرم، مدل متغیر، دبی ورودی سمت سرد و گرم =  $6.0 \text{ kg/s}$  مبدل های حرارتی U شامل 10، 20، 30، 40، 50 و 60 کانال.



جدول (۱) (استخراج شده از جدول الف) مقایسه کننده مشخصات حالت پایدار مبدل های حرارتی U و Z است. در این جدول می توان دید که اولاً؛ کلیه مشخصات حالت پایدار دو مبدل، بجز مقدار افت فشار، در تعداد کانال ها و دبی های یکسان بسیار نزدیک و حتی منطبق بر یکدیگر است و ثانیاً؛ همانطور که در بخش مقایسه توزیع نابرابر جریان در مبدلهای U و Z نیز اشاره شد، افت فشار مبدل Z همواره بیش از مبدل U است.

### نتیجه گیری

پاسخ گذرای دو مدل ریاضی ثابت و متغیر محاسبه انتقال حرارت در مبدل های حرارتی قاب و صفحه در این مقاله در مقام مقایسه قرار داده شده اند. در مورد پاسخ پله ای، درجه حرارت سمت سرد مبدل (سمت تحریک نشده) برای مدل ثابت همواره بیش از مدل متغیر است. درجه حرارت سمت گرم (سمت تحریک شده) برای مدل ثابت همواره کمتر از درجه حرارت بدست آمده از مدل متغیر است. در نتیجه مدل ثابت همواره مقدار بازدهی حرارتی بیشتری را نسبت به مدل ثابت بدست می دهد.

در بررسی اثر افزایش تعداد کانال ها در دبی ثابت بر توزیع نابرابر جریان و انتقال حرارت در مبدل های حرارتی قاب و صفحه نکات قابل توجه عبارتند از:  
الف- توزیع نابرابر جریان در دبی ثابت و با افزایش تعداد کانال تشدید می شود.

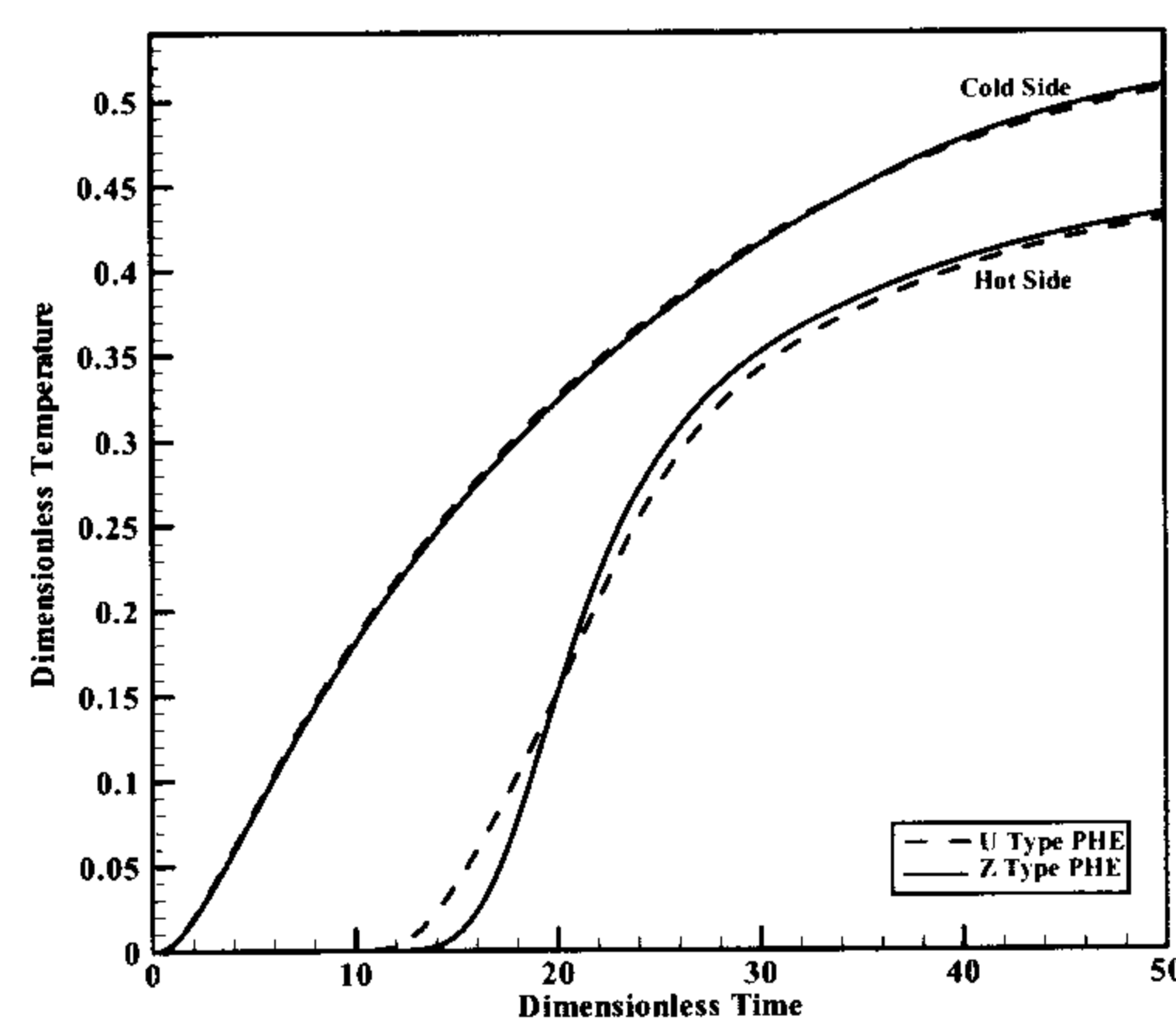
ب- در تحریک پله ای، با افزایش تعداد کانال ها در دبی ثابت، مقادیر درجه حرارت حالت پایدار همگرا می شوند.  
ج- در تحریک پله ای، با افزایش تعداد کانال ها، درجه حرارت سمت سرد افزایش و درجه حرارت سمت گرم کاهش می یابد. در نتیجه بر مقدار بازدهی حرارتی مبدل افزوده می شود.

د- در تحریک پله ای، با افزایش تعداد کانال ها در دبی ثابت، سمت گرم (سمت تحریک شده) در ناحیه اوج گیری با نوساناتی مواجه می شود که این نوسانات با افزایش تعداد کانال ها تشدید می شود.

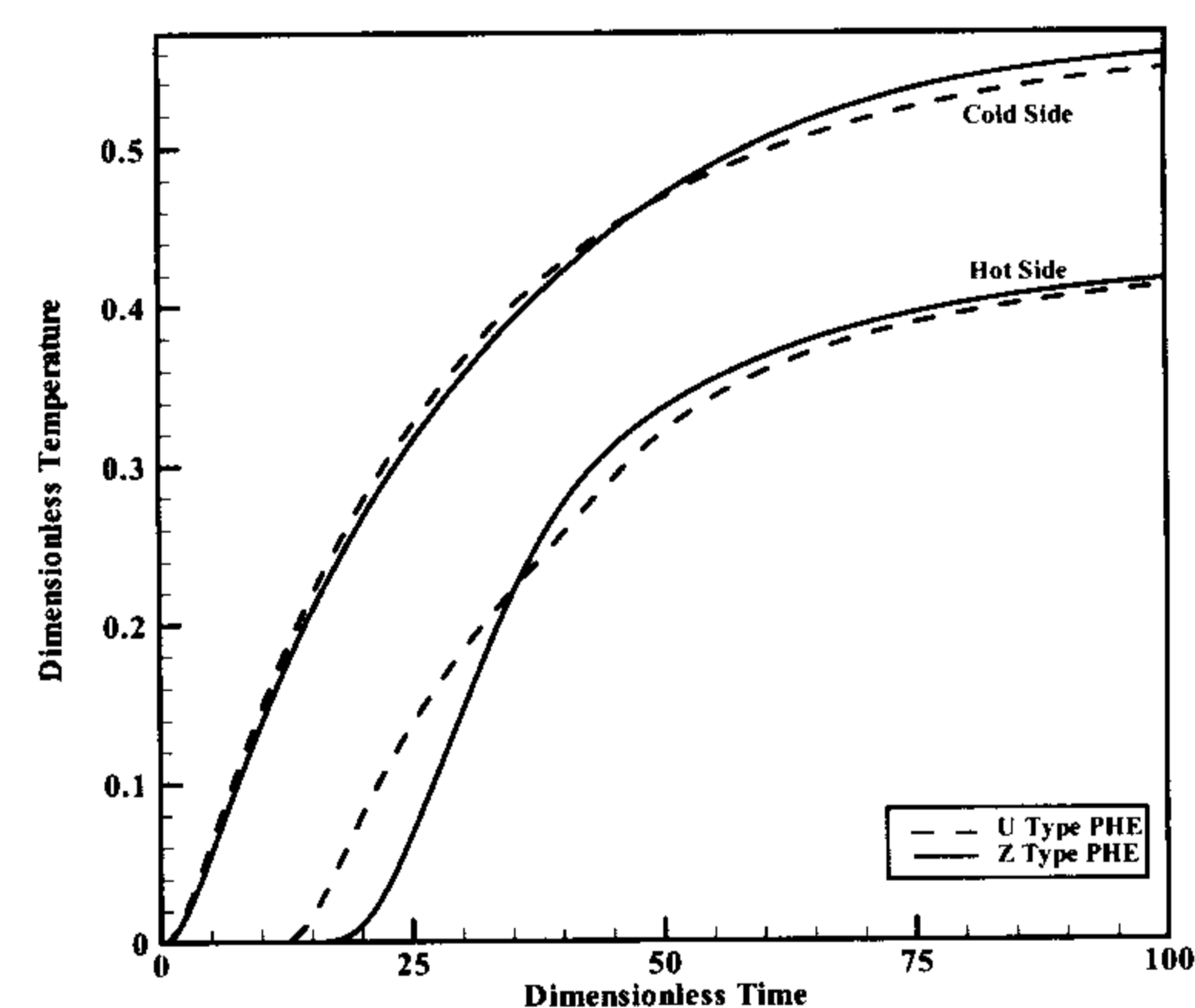
در بررسی اثر افزایش دبی در یک مبدل، نکات قابل توجه عبارتند از:

الف- پاسخ سمت تحریک شده مبدل U به تحریک مزبور سریعتر از پاسخ مبدل Z می باشد و با افزایش تعداد کانال ها این امر تشدید می شود.

ب- درجه حرارت حالت پایدار دو مبدل تقریباً برابر است.  
ج- با افزایش تعداد کانال ها نوسانات مشاهده شده در سمت تحریک شده مبدل U، در مبدل Z مشاهده نمی شود. دلیل این امر یکنواخت تر بودن توزیع نابرابر سرعت در مبدل های Z نسبت به مبدل های U است (بخش مقایسه توزیع نابرابر جریان) و نیز اینکه سیالات عبور کننده از کانال های مبدل Z مسافت های برابری را از ورودی تا خروجی مبدل می پیمایند در صورتیکه این مسافت در مبدل های U برای کانال های دورتر بیشتر است [۶].



شکل ۱۳: مقایسه پاسخ گذرای مبدل های U و Z دارای 40 کانال، مدل متغیر، دبی ورودی سمت سرد و گرم 6.0 kg/s، مبدل U (- -) و مبدل Z (-).



شکل ۱۴: مقایسه پاسخ گذرای مبدل های U و Z دارای 60 کانال، مدل متغیر، دبی ورودی سمت سرد و گرم 6.0 Kg/s، مبدل U (- -) و مبدل Z (-).

جدول ۱: مشخصات حالت پایدار مبدل های حرارتی U و Z در دبی ورودی 6.0 kg/s.

NUMBER OF CHANNELS	PHE TYPE	COLD SIDE INLET FLOW RATE [kg/s]	HOT SIDE INLET FLOW RATE [kg/s]	COLD SIDE PRESSURE DROP [Pa]	HOT SIDE PRESSURE DROP [Pa]	COLD SIDE OUTLET TEMPERATURE (DIM. LESS)	HOT SIDE OUTLET TEMPERATURE (DIM. LESS)	THERMAL EFFECTIVENESS (%)	LMTD	NTU	OVERALL HEAT TRANSFER COEFFICIENT [W/m <sup>2</sup> k]
8	U	6.0	6.0	6605	6083	0.38	0.62	37.9	0.62	0.61	4563
8	Z	6.0	6.0	8206	7598	0.38	0.62	37.9	0.62	0.61	4544
10	U	6.0	6.0	4536	4178	0.40	0.60	40.4	0.59	0.68	3944
10	Z	6.0	6.0	5602	5187	0.40	0.60	40.4	0.60	0.68	3926
20	U	6.0	6.0	1535	1414	0.48	0.52	47.5	0.52	0.91	2498
20	Z	6.0	6.0	1838	1702	0.48	0.53	47.6	0.53	0.90	2487
30	U	6.0	6.0	949	876	0.51	0.49	51.3	0.49	1.06	1905
30	Z	6.0	6.0	1105	1023	0.51	0.49	51.4	0.49	1.05	1898
40	U	6.0	6.0	765	706	0.54	0.46	53.9	0.46	1.16	1566
40	Z	6.0	6.0	883	818	0.54	0.46	54.1	0.46	1.17	1564
50	U	6.0	6.0	697	644	0.56	0.44	55.9	0.44	1.25	1337
50	Z	6.0	6.0	819	759	0.56	0.44	56.1	0.44	1.26	1343
60	U	6.0	6.0	671	620	0.57	0.43	57.8	0.43	1.32	1167
60	Z	6.0	6.0	819	759	0.57	0.43	57.7	0.43	1.33	1182

الف- در تحریک پله ای، با افزایش دبی در هر دو سمت مبدل، از مقدار بازدهی مبدل کاسته می شود.  
 ب- در تحریک پله ای، با افزایش دبی یک سمت بر مقدار بازدهی مبدل به میزان قابل توجهی افزوده می شود. شایان ذکر است که در حالت برابری دبی های دو سمت، مبدل کمترین مقدار بازدهی را داراست.  
 ج- در تحریک پله ای، در حالت کاهش دبی ورودی به مبدل، نوساناتی در ناحیه اوج گیری پاسخ سمت تحریک شده ظاهر می شود که با افزایش تعداد کانال ها نیز تشدید می شود.

### فهرست علائم

A : سطح مقطع کانال (سطح عبور دهنده جریان)  
[m<sup>2</sup>]

h : ضریب جابجایی حرارتی [W/m<sup>2</sup>K]

C : گرمای ویژه [J/kg.K]

D<sub>hydr</sub> : قطر هیدرولیکی کانال [m]

D : قطر هدر [m]

f : ضریب اصطکاک

L : طول کانال [m]

N : تعداد کانال های مبدل حرارتی

Nu : عدد نوسلت

NTU : تعداد واحد های انتقال حرارت

Pr : عدد پرانتل

Q : دبی جریان [kg/s]

Re : عدد رینولدز

t : زمان [sec]

T : درجه حرارت [K]

V<sub>in</sub> : سرعت سیال ورودی به مبدل [m/s]

W : ضخامت دیواره [m]

x : مکان (در امتداد دیواره کانال) [m]

X : مکان بی بعد

Z : زمان بی بعد

ε : بازدهی حرارتی

ρ : چگالی سیال [kg/m<sup>3</sup>]

η : ویسکوزیته [N.s/m<sup>2</sup>]

Θ : درجه حرارت بی بعد

### اندیسها

1 : مشخص کننده خواص سیال در کانال های فرد

2 : مشخص کننده خواص سیال در کانال های زوج

w : مشخص کننده دیواره کانال ها

c : مشخص کننده کانال

جدول الف : مشخصات حالت پایدار مبدل های حرارتی قاب و صفحه، محاسبه شده توسط دو مدل ثابت (مدل ۱) و متغیر (مدل ۲).

NUMBER OF CHANNELS	PHE TYPE	COLD SIDE INLET FLOW RATE [kg/S]	HOT SIDE INLET FLOW RATE [kg/S]	COLD SIDE PRESSURE DROP [Pa]	HOT SIDE PRESSURE DROP [Pa]	COLD SIDE OUTLET TEMPERATURE (DIM. LESS)	HOT SIDE OUTLET TEMPERATURE (DIM. LESS)	THERMAL EFFECTIVENESS (%)	LMTD	NTU	OVERALL HEAT TRANSFER COEFFICIENT [W/m <sup>2</sup> k]	SIMULATION MODEL
20	U	4.0	4.0	760	700	0.51	0.49	50.8	0.49	1.03	1896	2
20	U	5.0	5.0	1119	1031	0.49	0.51	49.0	0.51	0.96	2207	2
20	U	6.0	6.0	1535	1414	0.48	0.52	47.5	0.52	0.91	2498	2
30	U	4.0	4.0	469	433	0.55	0.45	55.0	0.45	1.20	1447	2
30	U	5.0	5.0	692	638	0.53	0.47	53.0	0.47	1.12	1683	2
30	U	6.0	6.0	949	876	0.51	0.49	51.3	0.49	1.06	1905	2
40	U	4.0	4.0	378	349	0.57	0.43	57.1	0.43	1.33	1189	2
40	U	5.0	5.0	557	514	0.55	0.45	55.4	0.45	1.23	1384	2
40	U	6.0	6.0	765	706	0.54	0.46	53.9	0.46	1.16	1566	2
50	U	5.0	5.0	508	469	0.57	0.43	57.4	0.43	1.33	1181	2
50	U	6.0	6.0	697	644	0.56	0.44	55.9	0.44	1.25	1337	2
60	U	6.0	6.0	671	620	0.57	0.43	57.8	0.43	1.32	1167	2
20	U	4.0	4.0	-	-	0.52	0.48	51.5	0.48	1.06	1945	1
20	U	5.0	5.0	-	-	0.50	0.50	49.7	0.50	0.99	2264	1
20	U	6.0	6.0	-	-	0.48	0.52	48.3	0.52	0.93	2563	1
30	U	4.0	4.0	-	-	0.55	0.45	55.4	0.45	1.24	1488	1
30	U	5.0	5.0	-	-	0.54	0.47	53.6	0.46	1.15	1732	1
30	U	6.0	6.0	-	-	0.52	0.48	52.2	0.48	1.09	1960	1
40	U	4.0	4.0	-	-	0.58	0.42	58.0	0.42	1.18	1230	1
40	U	5.0	5.0	-	-	0.56	0.44	56.2	0.44	1.28	1431	1
40	U	6.0	6.0	-	-	0.55	0.45	54.8	0.45	1.21	1619	1
50	U	5.0	5.0	-	-	0.58	0.42	58.2	0.42	1.39	1233	1
50	U	6.0	6.0	-	-	0.57	0.43	56.7	0.43	1.31	1395	1
60	U	6.0	6.0	-	-	0.58	0.42	58.3	0.42	1.40	1236	1
20	Z	4.0	4.0	905	838	0.51	0.49	50.8	0.49	1.03	1887	2
20	Z	5.0	5.0	1336	1238	0.49	0.51	49.0	0.51	0.96	2197	2
20	Z	6.0	6.0	1838	1702	0.48	0.53	47.6	0.53	0.90	2487	2
30	Z	4.0	4.0	544	504	0.55	0.46	54.7	0.45	1.20	1441	2
30	Z	5.0	5.0	803	744	0.53	0.47	52.9	0.47	1.12	1677	2
30	Z	6.0	6.0	1105	1023	0.51	0.49	51.4	0.49	1.05	1898	2
40	Z	4.0	4.0	434	402	0.57	0.43	57.3	0.43	1.33	1187	2
40	Z	5.0	5.0	642	595	0.55	0.45	55.5	0.45	1.24	1382	2
40	Z	6.0	6.0	883	818	0.54	0.46	54.1	0.46	1.17	1564	2
50	Z	5.0	5.0	596	552	0.57	0.43	57.5	0.43	1.33	1186	2
50	Z	6.0	6.0	819	759	0.56	0.44	56.1	0.44	1.26	1343	2
60	Z	6.0	6.0	819	759	0.57	0.43	57.7	0.43	1.33	1182	2
20	Z	4.0	4.0	-	-	0.52	0.49	51.5	0.49	1.06	1945	1
20	Z	5.0	5.0	-	-	0.50	0.50	49.7	0.50	0.99	2264	1
20	Z	6.0	6.0	-	-	0.48	0.52	48.3	0.52	0.93	2563	1
30	Z	4.0	4.0	-	-	0.55	0.45	55.4	0.45	1.24	1488	1
30	Z	5.0	5.0	-	-	0.54	0.47	53.6	0.47	1.15	1732	1
30	Z	6.0	6.0	-	-	0.52	0.48	52.2	0.48	1.09	1960	1
40	Z	4.0	4.0	-	-	0.58	0.42	58.0	0.42	1.38	1230	1
40	Z	5.0	5.0	-	-	0.56	0.44	56.2	0.44	1.28	1431	1

مراجع

- 1 - Yang, W. J., Clark, J. A. and Arpaci, V. S. (1961). "Dynamic response of heat exchangers having internal heat sources – Part IV." *Journal of Heat Transfer*, PP. 321-338.

- 2 - Shah, R. K. (1981). "The transient response of heat exchangers, heat exchangers." *Thermal – Hydraulic Fundamentals and Design*, Edited by: s. Kakac, A.E. Bergles, F. Mayinger, Hemisphere Republishing Corporation, Mc Graw-Hill Book Company.
  - 3 - Lakshmanan, C. C. and Potter, O. E. (1990). "Dynamic simulation of plate heat exchangers." *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 33, No. 5, PP. 995-1002.
  - 4 - Das, S. K. and W. Roetzel, (1995). "Dynamic analysis of plate heat exchangers with dispersion in both fluids." *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 38, No. 6, PP. 1127-1140.
  - 5 - Das, S. K., Spang, B. and Roetzel, W. (1995). "Dynamic behavior of plate heat exchangers – experiments and modeling." *Journal of Heat Transfer*, Vol. 117, PP. 859-864.
  - 6 - Das, S. K. and Roetzel, W. (1995). "Hyperbolic axial dispersion model: concept and its application to a plate heat exchanger." *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 38, No. 16, PP. 3065-3076.
  - 7 - Fox, R. W. and McDonald, A. T. (1994). *Introduction to Fluid Mechanics*, John Wiley & Sons, Inc., 4<sup>th</sup> Edition.
  - 8 - *Heat Exchanger Design Handbook*, (1998). Begell House, Inc. New York, Wallingford (UK).
  - 9 - Vishwas V. and Wadekar, A. (2000). CHE's Guide to CHES, HTFS, AEA Technology, Hyprotech, CEP, PP. 38-49.
  - 10 - Shokouhmand, H. and Khareghani, N. (2003). "Transient response of plate heat exchangers under flow maldistribution and viscosity variations." *7TH int. Symp. on Fluid Control, Measurement and Visualization, FLUCOME '03*, Sorrento, Italy – August .
- ۱۱- شکوهمند، ح. و خارقانی، ن. "پاسخ گذرای مبدل های حرارتی قاب و صفحه و بررسی اثر تغییرات ویسکوزیته و توزیع." پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده فنی دانشگاه تهران.

### واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Laminar Flow
- 2 - Turbulent Flow