

## روش گرافیکی نوین مبتنی بر فناوری پینچ برای افزایش زمان رسوب‌گذاری شبکه مبدل‌های حرارتی

اباذر وحدت آزاد، هادی غائبی، مجید عمیدپور\*<sup>+</sup>

تهران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی مکانیک

**چکیده:** در این مقاله یک روش گرافیکی جدید برای بررسی زمان رسوب‌گذاری شبکه مبدل‌های حرارتی ارائه شده است. هدف از انجام این کار، افزایش مدت زمانی است که شبکه مبدل‌های حرارتی می‌تواند بدون نیاز به انجام فرایند رسوب‌زدایی، عملیات انتقال حرارت مورد نیاز را انجام دهد. در شبکه مبدل‌های حرارتی، تعدادی از جریان‌ها دارای نرخ رسوب‌گذاری بیشتری نسبت به سایر جریان‌ها می‌باشند. در این روش فرصت بیشتری برای جریان‌های با نرخ رسوب‌گذاری بیشتر برای رسوب‌گذاری داده می‌شود. در واقع جریان‌های با نرخ رسوب‌گذاری بیشتر با جریان‌های با نرخ رسوب‌گذاری کمتر بین مبدل‌های حرارتی گوناگون جایگزین می‌شوند تا زمان بیشتری به کل شبکه مبدل‌های حرارتی برای رسوب‌گذاری داده شود. در این صورت تعداد دفعات تمیزکاری شبکه مبدل‌های حرارتی در یک بازه‌ی زمانی مشخص کاهش می‌یابد. جابه‌جایی جریان‌ها مستلزم عبور جریان با نرخ رسوب‌گذاری بیشتر از مکانی است که قبلاً جریان با نرخ رسوب‌گذاری کمتر عبور کرده است و برعکس. در نتیجه جریان ثانویه با پس‌مانده‌های جریان اولیه مخلوط می‌شود. بنابراین باید تطابق و سازگاری ساختار جریان‌ها (برای جلوگیری از تخریب جریان‌ها) و ملاحظات دمایی (برای رسیدن به انتقال حرارت دلخواه) لحاظ شود. منظور از ملاحظات دمایی، باقی‌ماندن خروجی جریان‌ها در بازه‌ی از پیش تعیین شده است. این روش می‌تواند در واحدهایی که مسئله رسوب‌زدایی و هزینه‌های مربوط به آن در دسترس است، به کار گرفته شود. (برای مثال؛ صنایع لبنی)

**واژه‌های کلیدی:** فناوری پینچ، رسوب‌گذاری، زمان رسوب‌گذاری، شبکه مبدل‌های حرارتی.

**KEY WORDS:** PINCH technology, Fouling, Time of fouling formation, Heat exchanger network.

### مقدمه

تشکیل رسوب ممکن است به‌صورت عمده طراحی مبدل حرارتی را تحت تأثیر قرار دهد و می‌تواند مقدار مواد به کار رفته برای ساخت مبدل حرارتی و کارایی آن را در مدت فعالیت مبدل بین زمان‌های تمیزکاری تعیین کند. کاهش انتقال گرما و افزایش افت فشار به دست آمده از تشکیل رسوب، بازده مبدل حرارتی را کاهش می‌دهد. تشکیل رسوب در مبدل‌های حرارتی، هزینه‌های اضافی در بخش صنعت ایجاد می‌کند. هزینه اضافه‌شده

فناوری پینچ امروزه کاربرد گسترده‌ای در صنایع گوناگون دارد. آنالیز پینچ در اساس با تکیه بر مفاهیم ترمودینامیکی برای استفاده بهینه از انرژی در واحدهای فرایندی توسعه داده شده است [۱، ۲]. ارائه مفهوم "فناوری پینچ" در بین سال‌های ۱۹۷۸ تا ۱۹۸۲ میلادی توسط Linhoff و همکاران انجام گرفت [۳].

اصطلاح رسوب در مورد مبدل‌های حرارتی، به مواد ناخواسته‌ای گفته می‌شود که بر روی سطح مبدل تشکیل می‌شود.

\*E-mail: amidpour@kntu.ac.ir

\*عهده دار مکاتبات

در این مقاله با استفاده از مفهوم فناوری پینچ و ارایه قوانین ابتکاری، یک روش گرافیکی برای آنالیز رسوب در شبکه مبدل‌های حرارتی ارایه شده است. در این روش با استفاده از جابه‌جایی جریان‌های با نرخ رسوب‌گذاری بیشتر با جریان‌های با نرخ رسوب‌گذاری کمتر، فرصت بیشتری به کل شبکه مبدل‌های حرارتی برای رسوب‌گذاری داده می‌شود. بنابراین تعداد دفعات تمیزکاری شبکه مبدل‌های حرارتی کاهش یافته و تولید واحد به علت کم شدن تعداد دفعات خاموش شدن شبکه مبدل‌های حرارتی افزایش می‌یابد. این امر باعث افزایش درآمد و کاهش هزینه‌های مربوط به رسوب‌زدایی به میزان قابل توجهی می‌شود.

### شرح مسأله

در شبکه مبدل‌های حرارتی، تعدادی مبدل حرارتی قرار دارند که جریان‌های ورودی به هر مبدل با توجه به اهداف و ملاحظات دمایی چیدمان شده‌اند. یکی از مهمترین مسأله‌ها در شبکه مبدل‌های حرارتی، مشکل رسوب‌گذاری جریان‌های آنها است. در یک مبدل حرارتی، مقدار رسوب به حدی می‌رسد که مقاومت حرارتی آن مانع انجام انتقال حرارت دلخواه می‌شود و دماهای جریان‌های خروجی از مبدل حرارتی در بازه‌ی از پیش تعریف شده قرار نمی‌گیرد. در این حالت باید مبدل حرارتی از مدار خارج شود و عملیات تمیزکاری روی آن انجام شود.

در بعضی از واحدها که شامل مبدل‌های حرارتی گوناگونی می‌باشند، جریان‌های آنها بر روی هم اثر متقابلی دارند. برای مثال در شکل ۱ خارج شدن مبدل حرارتی E4119 از مدار باعث می‌شود تا به ناچار سایر مبدل‌ها و تجهیزات هم از مدار خارج شوند و این امر باعث ایجاد وقفه در امر تولید می‌شود.

با دقت در مطالب گفته شده به این نتیجه می‌توان رسید که جریان‌های بحرانی جریان‌هایی هستند که دوره زمانی رسوب‌گذاری کمتری دارند و مبدل‌هایی که این جریان‌ها از آنها عبور می‌کنند، در مدت زمان کمتری دچار گرفتگی می‌شوند. در اینجا با شناخت رفتار رسوب‌گذاری جریان‌هایی که در شبکه مبدل‌های حرارتی عملیات انتقال حرارت را انجام می‌دهند، روشی ارایه شده است که فرصت بیشتری برای تبادل حرارت و تشکیل رسوب به آن‌دسته از جریان‌هایی داده می‌شود که دوره زمانی رسوب‌گذاری آنها کمتر است.

به شکل افزایش هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، افزایش هزینه تعمیر و نگهداری، افت تولید و تلفات انرژی می‌باشد. تشکیل رسوب همچنین باعث تغییر دماهای خروجی جریان‌های مبدل‌های حرارتی نسبت به مقدار از پیش تعیین شده می‌شود.

*Taborek* و همکاران [۴] رسوب را به عنوان مسأله عمده حل نشده در انتقال گرما مطرح کرده‌اند. گروه‌های تشکیل رسوب بر اساس تقسیم‌بندی که توسط Epstein [۵] انجام شده، به‌طور گسترده مورد قبول واقع شده است. مطابق این تقسیم‌بندی، گروه‌های تشکیل رسوب شامل شش گروه عمده هستند: تشکیل رسوب ذره‌ای<sup>(۱)</sup>، تشکیل رسوب با تبلور<sup>(۲)</sup>، تشکیل رسوب با خوردگی<sup>(۳)</sup>، تشکیل رسوب زنده<sup>(۴)</sup> و تشکیل رسوب با واکنش شیمیایی<sup>(۵)</sup>.

*Casado* [۶] مدلی را بر اساس هزینه تمیزکاری مبدل‌های حرارتی رسوب‌گرفته پیشنهاد داد. او مدل رسوب‌مجانایی را برای مبدل‌های حرارتی جریان مخالف انتخاب کرد و تحلیل گرمایی جریان‌های سرد و گرم را انجام داد. *Wang & Sunden* [۷] مدل‌سازی شبکه مبدل‌های حرارتی را با استفاده از معادلات موازنه انرژی و روابط بین ضریب‌های انتقال حرارت سیال‌های سرد و گرم و ضرایب رسوب انجام دادند. *Sanaye & Niroomand* [۸] پس از انجام مدل‌سازی شبکه مبدل‌های حرارتی با استفاده از داده‌های تجربی به‌دست‌آمده از یک واحد پتروشیمیایی، برنامه زمان‌بندی بهینه‌ای را برای تمیزکاری آن شبکه ارایه کرده‌اند.

*Yeap* و همکاران [۹] مدلی ترموهیدرولیکی برای کاهش رسوب‌گذاری مبدل‌های حرارتی پیش‌گرمایش نفت خام در پالایشگاه ارایه کردند. *Polly* و همکاران [۱۰] با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی رسوب نفت خام در مبدل‌های حرارتی واحد پیش‌گرمایش پالایشگاه، یک راه‌حل منطقی برای استفاده از بیشترین پتانسیل رسوب‌گذاری شبکه مبدل‌های حرارتی ارایه کرده‌اند. *Crittenden* و *Yang* [۱۱] با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی نرخ رسوب و شرایط بحرانی را برای لوله‌های مبدل‌های حرارتی مورد استفاده در پالایش نفت خام را پیش‌بینی کرده‌اند. آنها این شبیه‌سازی را در دو حالت بدون استفاده از insert و با استفاده از insert انجام داده‌اند. در سال ۲۰۱۰ میلادی، *Bani Kananeh* و همکاران [۱۲] استفاده از مواد نانویی را برای پوشش‌های مبدل‌های حرارتی و اشتردار صنایع لبنی جهت کاهش رسوب مورد بررسی قرار داده‌اند.

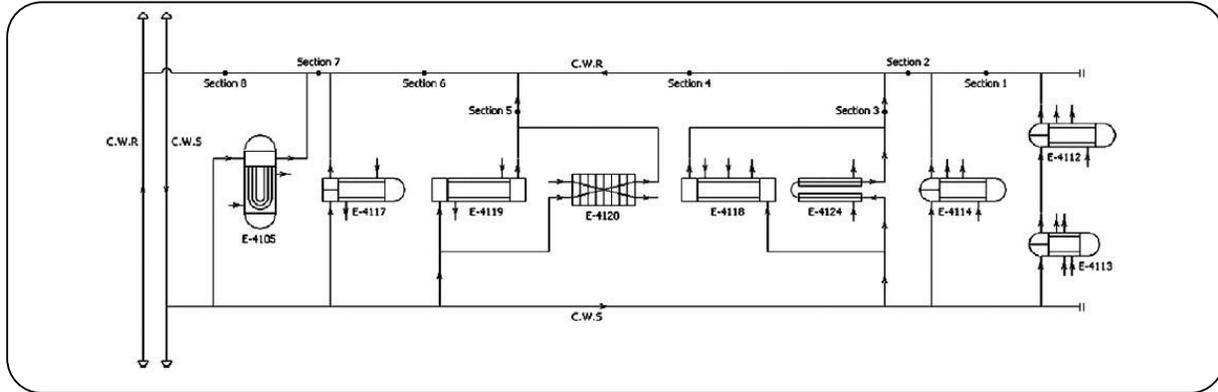
(۱) Particulate

(۲) Crystalization

(۳) Corrosion

(۴) Bio fouling &amp; microorganisms

(۵) Chemical reaction



شکل ۱- شمای واحد اوره پتروشیمی خراسان [۱۲].

رسوب‌گذاری مربوط به جریان A است، باید از مدار خارج شود. اما اگر قبل از زمان  $T_A$  مکان جریان‌های A و C عوض شود، این زمان افزایش می‌یابد. در واقع با این کار به جریان تندرسوب A زمان و فرصت بیشتری برای رسوب‌گذاری داده شده است. در اینجا جریان‌هایی که مکان آنها باهم عوض می‌شوند زوج - جریان نامیده می‌شود.

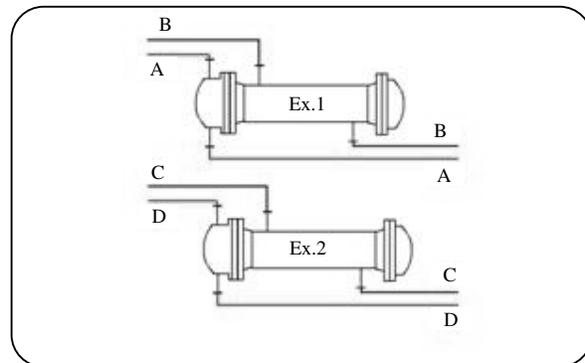
بنابراین حل مسئله شامل دو مرحله است. ابتدا زوج - جریان‌هایی را که دارای قابلیت جابه‌جایی هستند، مشخص کرده و سپس زمان مناسب برای تغییر مکان جریان‌ها را تعیین می‌کنیم. قابلیت‌های جابه‌جایی جریان‌ها به صورت زیر هستند:

۱- جابه‌جایی مکان جریان‌ها باید باعث بیشترین افزایش در دوره زمانی رسوب‌گذاری آنها شود.

۲- زوج - جریان‌ها باید باهم سازگار باشند. چون جای جریان فرضی A و C در شکل ۲ با هم عوض می‌شوند، در واقع جریان A از مکانی که قبلاً جریان C قرار داشته است، عبور می‌کند و مقدار باقیمانده جریان C در این مکان با جریان A مخلوط می‌شود. تغییرات ناشی از این اختلاط نباید بر کیفیت جریان A تأثیر ناخواسته داشته باشد. بنابراین باید معیارهایی برای کیفیت جریان‌ها در نظر داشت.

۳- باید انتقال حرارت دلخواه که جریان‌ها بر اساس آن در مبدل‌های حرارتی چیدمان شده‌اند، تأمین شود. یعنی دماهای خروجی جریان‌ها باید در بازه‌ی از پیش تعریف شده قرار بگیرند.

۴- جریان ثانوی پس از تغییر موقعیت نباید دارای تأثیر ناخواسته بر روی جنس مبدل باشد. به عنوان مثال جریان‌های اسیدی در مبدل‌های حرارتی ویژه‌ای می‌توانند قرار بگیرند.



شکل ۲- شبکه مبدل‌های حرارتی شامل دو مبدل حرارتی Ex.1 و Ex.2.

در این مقاله به جریان‌هایی که دوره زمانی رسوب‌گذاری آنها کمتر است جریان‌های تندرسوب گفته شود. در مقابل جریان‌های تندرسوب، جریان‌های کندرسوب وجود دارند که دوره زمانی رسوب‌گذاری آنها طولانی‌تر است؛ یعنی بازه زمانی بین دو فرایند تمیزکاری زیاد است. در مبدل‌های حرارتی با جریان‌های کندرسوب تعداد دفعات تمیزکاری شبکه مبدل‌های حرارتی و هزینه‌های مربوط به آنها در یک بازه زمانی مشخص کم است.

طول دوره زمانی رسوب‌گذاری جریان‌های تندرسوب کمتر می‌باشد. اما با روش پیشنهادی این مقاله با تغییر مکان جریان‌های تندرسوب می‌توان این زمان را افزایش داد. در شکل ۲ دو مبدل حرارتی Ex.1 و Ex.2 نشان داده شده است که به ترتیب دارای جریان‌های A, B و C, D می‌باشند. جریان A مبدل حرارتی Ex.1 کمترین زمان رسوب‌گذاری و جریان C مبدل حرارتی Ex.2 بالاترین دوره زمانی رسوب‌گذاری را در بین A, B, C, D دارد. مبدل حرارتی Ex.1 بعد از گذشت زمان  $T_A$  که برابر با دوره زمانی

جدول ۱- مثالی از ضریب‌های رسوب در مبدل‌های پوسته و لوله‌ای.

ضریب رسوب طرف گرم مبدل (m <sup>2</sup> K/kW)	ضریب رسوب طرف سرد مبدل (m <sup>2</sup> K/kW)	
۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۲	فشار کم (تقریباً ۱ bar)
۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۲	گاز فشار بالا (تقریباً ۲۰ bar)
۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۴	مواد آلی مایع با ویسکوزیته کم
۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۸	مایع با ویسکوزیته بالا

مقدارهای  $R_i^\infty$  و  $\tau_i$  بر مبنای داده‌های تجربی هستند که از تغییرات دماهای ورودی و خروجی در یک دوره زمانی مشخص به دست می‌آیند.

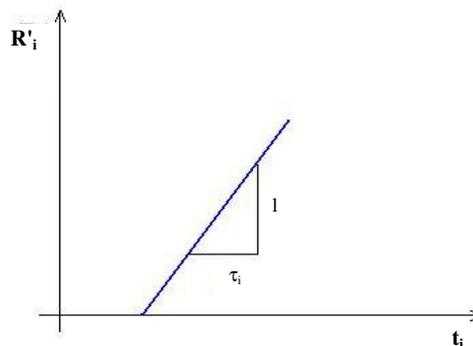
با استفاده از معادله (۱)،  $T_i$  به صورت زیر به دست می‌آید:

$$T_i = \tau_i / R_i' \quad (2)$$

$R_i'$  مقاومت ظاهری رسوب نامیده می‌شود و برابر است با:

$$R_i' = \ln \left( \frac{R_i^\infty}{R_i^\infty - R_i(t)} \right) \quad (3)$$

در صورتی که  $R_i(t) = F_i$  آنگاه  $R_i' = R_{i, \text{final}}$  می‌شود. یعنی مقدار  $R_i'$  از صفر تا  $R_{i, \text{final}}$  تغییر می‌کند. در شکل ۳ منحنی نهایی مقاومت ظاهری رسوب بر حسب زمان رسم شده است



شکل ۳- منحنی مقاومت ظاهری رسوب بر حسب زمان.

در مرحله دوم، با استفاده از روش گرافیکی پیشنهادی با نام 'پینچ رسوب' زمان تغییر مکان جریان‌ها مشخص می‌شود. یعنی برای هر زوج - جریان باید زمان تغییر مکان مشخص شود. ضریب رسوب (F) در واقع مقاومت حرارتی در پایان دوره رسوب‌گذاری است، که مانع از انتقال حرارت دلخواه می‌شود. در این حالت باید عملیات تمیزکاری صورت گیرد. ضریب رسوب به پارامترهایی از قبیل نوع مبدل، جنس مبدل، نوع، سرعت، فشار و دمای جریان بستگی دارد. در جدول ۱ مثالی از ضریب‌های رسوب برای مبدل‌های حرارتی پوسته و لوله‌ای آورده شده است. در این مقاله از مدل رسوب‌گذاری مجانبی<sup>(۱)</sup> برای برآورد و تخمین مقاومت رسوب ( $R_i(t)$ ) استفاده شده است.

$$R_i(t) = R_i^\infty \left( 1 - e^{-(t/\tau_i)} \right) \quad (1)$$

که:

$R_i^\infty$ : مقاومت رسوب مجانبی، (kW/m<sup>2</sup> K).

$T_i$ : بازه زمانی بین دو فرایند تمیزکاری متوالی (h).

$\tau_i$ : زمان میرایی در تشکیل رسوب (h).

### روش انجام کار

در این مقاله برای تعیین زمان تغییر جریان‌ها، از روش گرافیکی جدیدی که آن را پینچ رسوب<sup>(۱)</sup> می‌نامیم، استفاده شده است. مراحل روش پیشنهادی به صورت زیر است:

۱- مشخص کردن فلوشیت واحد.

۲- استخراج اطلاعات مربوط به رسوب جریان‌های مبدل‌های حرارتی ( $R_i^\infty, \tau_i, F_i, R_i'$ ).

۳- محاسبه زمان بین دو فرایند تمیزکاری متوالی برای هر جریان با استفاده از رابطه زیر:

$$\tau_i \times T_i = R_i' \quad (4)$$

۴- محاسبه مقدار میانگین  $T_i$  ها:

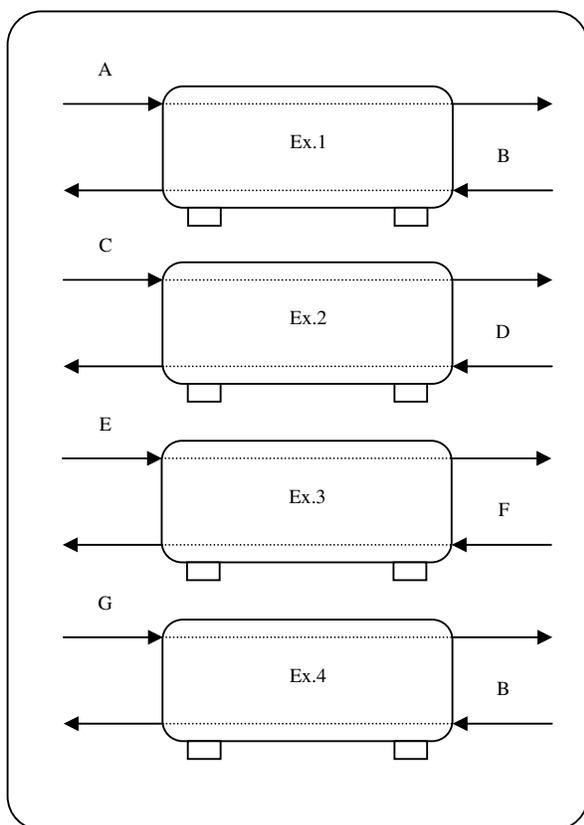
$$T_{\text{ava}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i \quad (5)$$

(۱) Asymptotic fouling formation model

(۲) Fouling pich

جدول ۲- مبدل‌های حرارتی به تفکیک جریان‌ها.

مبدل‌های حرارتی	جریان طرف اول مبدل حرارتی	جریان طرف دوم مبدل حرارتی
۱	A	B
۲	C	D
۳	E	F
۴	G	H



شکل ۴- شبکه مبدل‌های حرارتی با چهار مبدل حرارتی.

آبشار جریان‌های کند رسوب	آبشار جریان‌های تند رسوب
H	A
E	D
B	F
	G

شکل ۵- آبشار جریان‌های تندرسوب و کندرسوب.

۵- در این مرحله مشخص می‌شود که چه جریان‌هایی تند رسوب و چه جریان‌هایی کند رسوب هستند. برای این منظور قانون زیر بیان می‌شود:

هر جریانی که  $T_i$  مربوط به آن کمتر از  $T_{ave}$  باشد، تند رسوب و هر جریانی که  $T_i$  مربوط به آن بیشتر از  $T_{ave}$  باشد، کند رسوب می‌باشد.

به عنوان مثال فرض می‌شود شبکه‌ای از مبدل‌های حرارتی شامل چهار مبدل حرارتی وجود دارد که جریان‌های A، B، C، D، E، F، G، H به ترتیب در آنها جریان دارند (شکل ۴). در این مثال فرض بر این است که این مبدل‌ها بر روی هم اثر متقابل دارند. در جدول ۲ این جریان‌ها به تفکیک مبدل‌ها آورده شده است. با توجه به قانون گفته شده، جریان‌های تندرسوب و کندرسوب مشخص می‌شوند. در این شبکه مبدل‌های حرارتی، فرض شده است که جریان‌های A، D، F، G تند رسوب و جریان‌های B، C، E، H کند رسوب می‌باشند.

#### ۶- رسم آبشار جریان‌ها

- جریان‌های کندرسوب در یک ردیف عمودی بر اساس افزایش زمان  $T_i$  های مربوطه چیده می‌شوند. این آرایش، آبشار جریان‌های کندرسوب است.

- به همین ترتیب آبشار جریان‌های تندرسوب در یک ردیف عمودی بر اساس کاهش زمان  $T_i$  های مربوطه چیده می‌شوند. این آرایش، آبشار جریان‌های تندرسوب است.

آبشار جریان‌های تندرسوب و کندرسوب شبکه مبدل‌های حرارتی فرضی شکل ۴ در شکل ۵ نشان داده شده است.

۷- در این مرحله زوج - جریان‌ها مشخص می‌شوند. یعنی گروه‌هایی را که هر کدام از دو جریان تندرسوب و کندرسوب تشکیل شده‌اند، تعیین می‌شوند. این گروه‌بندی باید بر اساس قابلیت‌هایی که در بخش شرح مسأله آورده شده، انجام شود. برای این کار قانون زیر بیان می‌کنیم که باعث بیشترین افزایش در دوره زمانی رسوب‌گذاری مبدل‌های حرارتی می‌شود:

جدول ۳- زوج - جریان های شبکه فرضی مبدل های حرارتی.

جریان کندرسوب/جریان تندرسوب	زوج - جریان ها
A/H	۱
D/E	۲
F/C	۳
G/B	۴

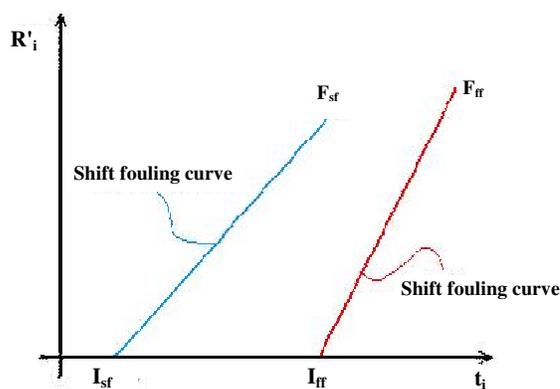
جریان کندرسوب با بیشترین  $T_i$  باید با جریان تندرسوب با کمترین  $T_i$  تعویض شود. با توجه به آیشار جریان ها (شکل ۵)، جریان هایی را که در مقابل هم قرار می گیرند، در یک گروه قرار داده و نام زوج - جریان به آنها نهاده می شود. به این ترتیب زوج - جریان ها مشخص می شوند (جدول ۳).

۸ - منحنی مقاومت ظاهری رسوب بر حسب زمان برای هر زوج - جریانی که در مرحله قبل (۷) مشخص شده است، رسم می شود. شکل ۶ منحنی مقاومت ظاهری رسوب بر حسب زمان را برای زوج - جریان فرضی A/H نشان می دهد. نکته ای که بایستی رعایت کرد این است که منحنی جریان تندرسوب (A) در سمت راست منحنی کندرسوب (H) رسم شود. در شکل ۶ نقطه های  $I_{sf}$  و  $F_{sf}$  به ترتیب نشانگر شروع و پایان دوره رسوب گذاری برای جریان کندرسوب و به همین ترتیب،  $I_{ff}$  و  $F_{ff}$  به ترتیب نشانگر شروع و پایان دوره رسوب گذاری برای جریان تندرسوب هستند.

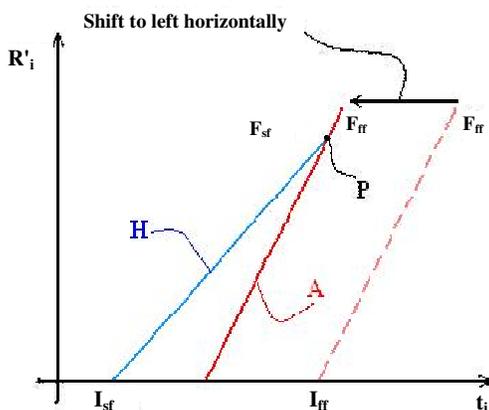
۹ - منحنی جریان تندرسوب در راستای افقی به سمت چپ انتقال داده می شود تا با منحنی جریان کندرسوب برخورد کند (شکل ۷). نقطه برخورد با P نشان داده شده و آن نقطه "پینچ نامیده می شود. ۱۰ - از ابتدای منحنی تندرسوب ( $I_{ff}$ ) خطی عمودی به سمت بالا رسم می شود تا منحنی کندرسوب را در نقطه Q قطع کند (شکل ۸). مقطع این خط با محور زمان نشانگر زمان تعویض مکان جریان های تندرسوب و کندرسوب می باشد.

۱۱ - در این مرحله از نقطه Q خطی به موازات منحنی تندرسوب رسم می شود تا محور زمان را در نقطه M قطع کند (شکل ۹). منحنی MQP را منحنی عملکرد طرف اول مبدل حرارتی Ex.1 می نامیم. قبل از تعویض جریان ها (مقطع زمانی بین نقطه M و نقطه Q) جریان A در طرف اول مبدل Ex.1 جریان داشته است. سپس در نقطه Q مکان جریان های A و H عوض شده است. در نتیجه جریان H در مقطع زمانی بین نقطه Q تا نقطه P در طرف اول مبدل Ex.1 جاری خواهد بود. همچنین جریان A بعد از مقطع زمانی نقطه Q در طرف دوم مبدل Ex.4 جریان پیدا می کند (یعنی همان جایی که قبلاً جریان H جاری بوده است).

در این پژوهش  $R'_{ij}$  نشانگر مقاومت ظاهری در طرف زمبدل Ex.i با توجه به جریانی که بعد از تعویض از آن می گذرد می باشد. فاصله عمودی نقاط  $I_{sf}$  و  $F_{sf}$  نشانگر میزان مقاومت ظاهری طرف اول مبدل Ex.1 ( $R'_{11}$ ) با فرض اینکه جریان H از آن بگذرد، می باشد. چون بعد از تعویض مکان جریان های A و H،



شکل ۶ - منحنی مقاومت ظاهری بر حسب زمان برای زوج - جریان A/H.



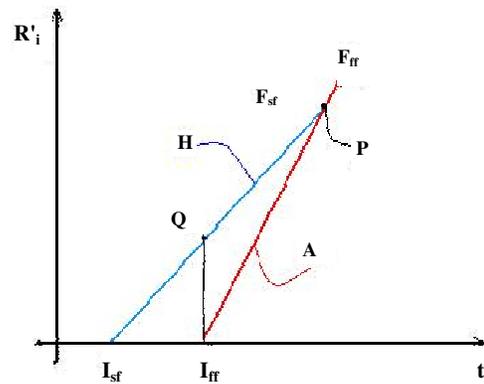
شکل ۷ - منحنی مقاومت ظاهری بر حسب زمان برای زوج - جریان A/H پس از انتقال منحنی تندرسوب در راستای افقی.

جریان H از این مکان (طرف اول مبدل Ex.1) عبور می‌کند، بیشترین مقاومت ظاهری قابل تشکیل در این مکان  $R'_{11}$  است. بنابراین فاصله عمودی منحنی عملکرد طرف اول مبدل Ex.1 (منحنی MQP) باید برابر  $R'_{11}$  باشد. این بدان معناست که نقطه M (که نقطه تلاقی منحنی عملکرد طرف اول مبدل Ex.1 با محور افقی است) نقطه مناسبی است؛ زیرا تصویر عمودی منحنی MQP برابر با  $R'_{11}$  می‌باشد.

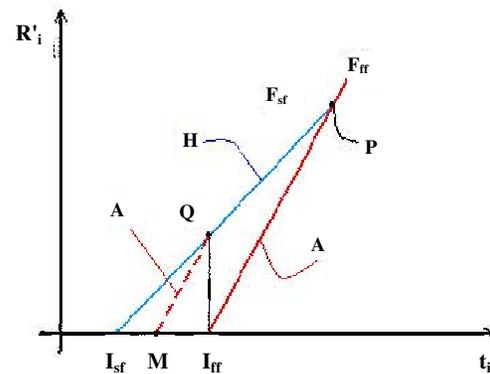
۱۲- از نقطه  $I_{ff}$  خطی موازی منحنی کندرسوب رسم شده و تا نقطه‌ای امتداد داده می‌شود که تصویر عمودی بین این نقطه (نقطه N) و نقطه P برابر  $R'_{ff}$  شود. همان‌گونه که پیش‌تر توضیح داده شد،  $R'_{ff}$  مقاومت ظاهری رسوب در طرف دوم مبدل حرارتی Ex.4 با توجه به جریانی که بعد از تغییر مکان جریان‌ها (جریان A) از آن می‌گذرد، می‌باشد. برای سادگی کار، خطی افقی با فاصله عمودی  $R'_{ff}$  از نقطه P و در سمت پایین آن کشیده می‌شود و خط مینا<sup>(۱)</sup> نامیده می‌شود. شکل ۱۰ بیان‌کننده این موضوع است.

۱۳- منحنی  $NI_{ff}P$  منحنی عملکرد طرف دوم مبدل حرارتی Ex.4 است. تصویر افقی این منحنی بر روی محور زمان، نشانگر بازه زمانی است که مبدل حرارتی Ex.4 از نقطه N با جریان H شروع به کار می‌کند و سپس در نقطه تقاطع با محور افقی (نقطه  $I_{ff}$ ) جای جریان گذرنده از آن (جریان H) با جای جریان گذرنده از طرف اول مبدل حرارتی Ex.1 (جریان A) عوض می‌شود. بنابراین شیب خط تغییر می‌کند و تا نقطه P در امتداد خط  $I_{ff}P$  ادامه می‌یابد.

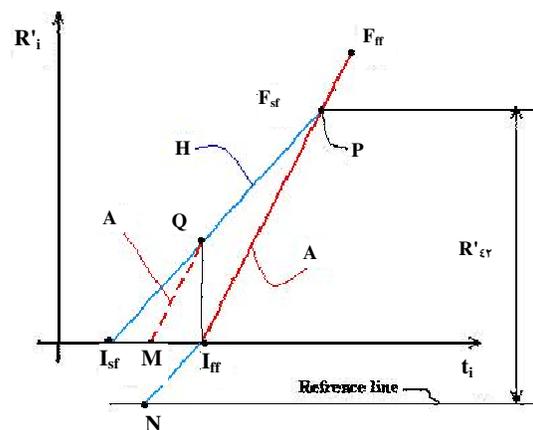
در منحنی عملکرد MQP مشاهده می‌شود که طرف اول مبدل Ex.1 در مدت زمان بین نقطه M و Q می‌تواند به تبادل حرارت بپردازد. با مقایسه زمان لازم برای رسیدن مقاومت ظاهری رسوب طرف اول مبدل حرارتی Ex.1 به مقدار نهایی آن (تصویر افقی منحنی MQP) با زمان لازم برای رسیدن مقاومت ظاهری رسوب طرف دوم مبدل حرارتی Ex.4 به مقدار نهایی آن (تصویر افقی منحنی  $NI_{ff}P$ ) کمترین آنها را به عنوان زمان مینا و منحنی مربوطه به عنوان منحنی مینا در نظر گرفته می‌شود. منظور از زمان مینا، مدت زمانی است که حداقل یک سمت از دو مبدل Ex.1 یا Ex.4 دچار گرفتگی شود (به عبارت دیگر مقاومت ظاهری رسوب در آنها به مقدار نهایی خود برسد) و امکان عملیات انتقال حرارت دلخواه وجود ندارد. لذا لازم است تا شبکه مبدل‌های حرارتی جهت انجام فرایند تمیزکاری از فعالیت خارج شود.



شکل ۸ - شکل مربوط به مقطع زمانی تعویض مکان جریان‌ها.



شکل ۹- منحنی عملکرد MQP.



شکل ۱۰- شکل مربوط به کشیدن خط مینا

این گونه مسأله‌ها آستانه نامیده می‌شوند. در حالت آستانه مقاومت ظاهری جریان تندرسوب از مقاومت ظاهری جریان کندرسوب کمتر است. در این گونه موارد زمان بازیابی شده برابر با  $T_i$  جریان تندرسوب است.

۱۸- مرحله‌های ۱ تا ۱۷ در صورتی قابل استفاده هستند که شرایط ۱ تا ۴ ذکر شده در بخش شرح مسأله احراز شده باشد.

### مطالعه موردی

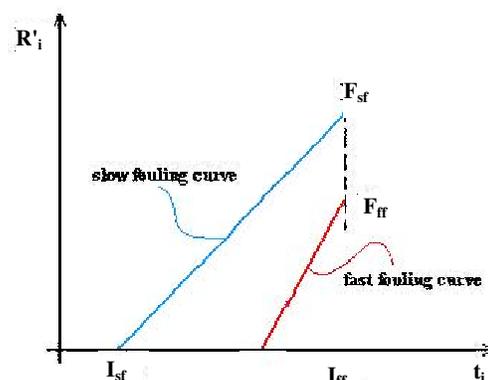
همان گونه که در بخش‌های قبلی توضیح داده شد، روش گرافیکی بر مبنای فناوری پینچ برای افزایش زمان کارکرد کل شبکه مبدل‌های حرارتی پیشنهاد شده است. در این قسمت یک مثال فرضی برای توضیح بیشتر آورده شده است. مبدل‌های حرارتی در صنایع لینی دارای نرخ رسوب‌گذاری بیشتری هستند، بنابراین مثال فرضی این بخش مبدل‌های حرارتی صنایع لینی می‌باشد. جریان‌هایی که باهم در یک گروه قرار می‌گیرند، باید سازگار باشند. جدول ۴ تعدادی از جریان‌های سازگار و ناسازگار را در یک واحد تولید لینی نشان می‌دهد. در این جدول منظور از عبارت "ok" در هر خانه جدول، این است که جریان موجود در ستون آن خانه می‌تواند جایگزین جریان موجود در سطر آن خانه شود. همچنین عبارت "ng" بیانگر عدم سازگاری جریان‌های موجود در ستون آن خانه با جریان موجود در سطر آن خانه جدول با یکدیگر می‌باشد.

در جدول ۵ جریان‌های مربوط به سه مبدل حرارتی نشان داده شده است. فرض بر این است که تمام جریان‌ها باهم سازگار می‌باشند.  $R'_i$  و  $\tau_i$  برای هر جریان آورده شده است. با توجه به جدول ۵ و معادله ۴، زمان لازم ( $T_i$ ) برای رسوب‌گذاری جریان‌های مبدل‌های حرارتی تا حدی که مقاومت رسوب آنها به ضریب رسوب جریان برسد، به دست می‌آید. در جدول ۶ زمان  $T_i$  هر جریان در شبکه مبدل‌های حرارتی آورده شده است. شبکه مبدل‌های حرارتی باید بعد از کمترین زمان  $T_i$  باید برای انجام عملیات تمیزکاری خاموش شود. در واقع این مقدار همان  $TSAT_{BFP}$  سیستم است.

در این مرحله  $T_{ave}$  از معادله (۵) به دست می‌آید:

$$\frac{1}{6}(T_A + T_B + T_C + T_D + T_E + T_F) = 20.56 \text{ h} \quad (5)$$

(۱) Time Recovery Ratio (TRR)



شکل ۱۱- شکل مربوط به حالت آستانه.

هر کدام از نقطه‌های ابتدایی منحنی‌های عملکرد (نقطه M یا N) که فاصله افقی آن از نقطه پینچ کمتر باشد، به عنوان نقطه مینا در نظر گرفته می‌شوند. منظور از نقطه مینا، زمان شروع فعالیت مبدل‌های حرارتی مربوط به زوج - جریان  $A/H$  می‌باشد (مبدل‌های حرارتی Ex.1 و Ex.4). همچنین فاصله افقی بین نقطه مینا تا نقطه Q نشانگر زمان تعویض جریان‌ها از زمان شروع به کار مبدل‌های حرارتی مربوطه است.

۱۴- مرحله‌های ۸-۱۳ برای سایر زوج - جریان‌های مشخص شده در مرحله ۷ (زوج - جریان‌های  $D/E, F/C, G/B$ ) انجام می‌شوند.

۱۵- کمترین مقدار در بین زمان‌های مبنای زوج - جریان‌ها به عنوان زمان فعالیت کل سیستم (TSAT) در نظر گرفته می‌شوند. این زمان نشانگر مدت زمانی است که کل شبکه مبدل‌های حرارتی بدون نیاز به فرایند تمیزکاری می‌تواند به عملیات انتقال حرارت مطلوب در بین جریان‌ها بپردازد.

۱۶- برای برآورد زمان بازیابی شده، پارامتری با عنوان نسبت بازیابی زمان<sup>(۱)</sup> به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$TRR = \frac{TSAT_{AFP} - TSAT_{BFP}}{TSAT_{BFP}} \quad (6)$$

۱۷- برخی از زوج - جریان‌ها دارای شرایطی هستند که به آنها آستانه<sup>(۲)</sup> گفته می‌شود. به عنوان مثال اگر در شکل ۱۱ جریان تندرسوب به سمت چپ انتقال داده شود تا حدی که نقطه‌های  $F_{sf}$  و  $F_{ff}$  در یک راستای عمودی قرار بگیرند؛ برخوردی بین دو منحنی جریان‌های تندرسوب و کندرسوب به وجود نخواهد آمد.

(۲) Threshold

جدول ۴- جریان‌های سازگار و ناسازگار در یک واحد تولیدی لبنیات.

شیر موز	شیر عسل	کره	خامه	کشک	شیرکاکائو	شیر	شیر قهوه	جریان ثانویه
								در مبدل حرارتی
ok	ok	ng	ng	ng	ok	ok	ok	شیر قهوه
ok	ok	ok	ok	ng	ng	ok	ng	شیر
ok	ok	ng	ok	ng	ok	ok	ok	شیرکاکائو
ng	ok	ng	ok	ok	ng	ok	ng	کشک
ok	ok	ok	ok	ng	ng	ok	ng	خامه
ok	ok	ok	ok	ng	ng	ok	ng	کره
ok	ok	ok	ok	ng	ng	ok	ng	شیر عسل
ok	ok	ok	ok	ng	ng	ok	ng	شیر موز

جدول ۵ - مشخصات مربوط به جریان‌های شبکه مبدل‌های حرارتی با سه مبدل حرارتی دارای جریان‌های سازگار.

$\tau_i$ (h)	$R'_i$	جریان‌ها	مبدل‌های حرارتی
۸٫۳	۸	A	Ex.1
۳٫۲	۵	B	
۱۹٫۹	۴٫۵	C	Ex.2
۷٫۵	۵	D	
۱۹٫۵	۴	E	Ex.3
۲٫۴	۵٫۷	F	

جدول ۶ - زمان مربوط به  $T_i$  جریان‌های شبکه مبدل حرارتی.

$T_i$ (h)	جریان‌ها	مبدل‌های حرارتی
۲۵	A	Ex.1
۱۲٫۳	B	
۲۸٫۹	C	Ex.2
۱۸٫۸	D	
۲۶٫۸۵	E	Ex.3
۱۱٫۴۸	F	

جدول ۷- جریان‌های تندرسوب و کندرسوب.

جریان‌های کندرسوب	جریان‌های تندرسوب
A	B
C	D
E	F

جدول ۸- جریان‌های شبکه مبدل‌های حرارتی بعد از تعویض آنها.

جریان‌ها	مبدل‌های حرارتی
D	Ex.1
E	
F	Ex.2
A	
B	Ex.3
C	

آبشار جریان‌های کندرسوب	آبشار جریان‌های تندرسوب
A	D
E	B
C	F

شکل ۱۲- منحنی مقاومت ظاهری بر حسب زمان برای زوج - جریان D/A.

در جدول ۸ نتیجه‌های روش سیمپلکس [۱۳]، که یک برنامه‌ریزی خطی (روش ریاضی) است، با نتایج روش پینچ رسوب مقایسه شده است. با توجه به جدول ۸، زمان مبنای فعالیت زوج - جریان‌های  $F/C$ ،  $B/E$ ،  $D/A$  ۰٫۲ ساعت از زمان به‌دست‌آمده از روش سیمپلکس کمتر است. اختلاف بین جواب‌ها حدود ۱/۳ - ۱/۲٪ می‌باشد. این مقدار خطا قابل چشم‌پوشی می‌باشد. به دلیل این‌که روش گرافیکی با در اختیار گذاشتن تصمیم‌سازهای دیداری و مفهومی، امکان تصمیم‌گیری بهتر را به ما می‌دهد، با دوباره حل کردن مسأله، مقدار خطا کاهش می‌یابد. برای بالا بردن دقت روش گرافیکی می‌توان از روش‌های پینچ اصلاح‌شده مبتنی بر روش‌های جدولی [۱۵، ۱۴] استفاده کرد.

با توجه به تعریف جریان‌های تندرسوب و کندرسوب، این جریان‌ها در جدول ۷ نشان داده می‌شود.

حال آبشار جریان‌ها (شکل ۱۲) را می‌سازیم.

با توجه به آبشار جریان‌ها زوج - جریان‌ها  $F/C$ ،  $B/E$ ،  $D/A$  می‌باشند. در جدول ۸ چیدمان جدید جریان‌های شبکه مبدل‌های حرارتی بعد از تعویض جریان‌ها آورده شده است.

شکل ۱۳ منحنی مقاومت ظاهری بر حسب زمان را برای زوج - جریان  $D/A$  نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیداست بعد از انتقال افقی منحنی جریان تندرسوب  $D$  به سمت چپ، تا جایی که نقاط انتهایی سمت راست آن با نقطه انتهایی سمت راست منحنی کندرسوب در یک راستای عمودی قرار بگیرد، هیچ برخوردی بین آن و منحنی جریان کندرسوب  $A$  به‌وجود نیامده است. بنابراین این مسأله از نوع آستانه است و با توجه به ماهیت این گونه مسأله‌ها، در آنها جای جریان‌ها باهم عوض نمی‌شود و بیشینه زمان فعالیت برای مبدل‌های حرارتی این زوج - جریان (مبدل‌های حرارتی  $Ex.1$  و  $Ex.2$ ) همان زمان مربوط به جریان تندرسوب  $D$  می‌باشد ( $18/8 h$ ).

در شکل ۱۳ منحنی مقاومت ظاهری بر حسب زمان برای زوج - جریان  $C/F$  نشان داده شده است. با توجه به روش انجام کار (موردهای ۱ تا ۱۳ در بخش روش انجام کار)، زمان تعویض جریان‌ها ۶٫۲ ساعت بعد از شروع فعالیت سامانه و زمان مبنای زوج - جریان  $C/F$ ، ۱۵٫۴ ساعت است.

منحنی مقاومت ظاهری بر حسب زمان برای زوج - جریان  $B/E$  در شکل ۱۴ نشان داده شده است. پس از اعمال روش پیشنهادی پینچ رسوب، زمان تعویض جریان‌ها، ۶٫۲ ساعت بعد از شروع فعالیت سامانه به‌دست می‌آید. همچنین زمان مبنای زوج - جریان  $B/E$ ، ۱۶ ساعت می‌باشد.

در بین زمان‌های مبنای زوج - جریان‌ها، زمان مبنای زوج - جریان  $C/F$ ، کمترین مقدار ( $15/4 h$ ) را دارا می‌باشد. در نتیجه این مقدار، همان  $TSAT_{AFP}$  است. به عبارت دیگر زمان کل فعالیت سامانه از  $11/48$  ساعت به  $15/4$  ساعت افزایش یافته است.

## نتیجه‌ها و بحث

زمان مبنای فعالیت مربوط به هر یک از زوج - جریان‌ها از روش پینچ رسوب به‌دست آمد. به علت ماهیت گرافیکی این روش، دقت آن از روش‌های ریاضی کمتر است.

کمترین مقدار زمان مینا در بین زوج - جریان‌ها پس از به کار بردن روش پینچ رسوب، ۱۵/۴ ساعت است که در واقع همان  $TSAT_{AFP}$  می‌باشد. این مقدار قبل از اعمال روش پینچ رسوب ( $TSAT_{BFP}$ ) ۱۱/۴۸ ساعت بوده است. با توجه به معادله (۶) TRR به دست می‌آید:

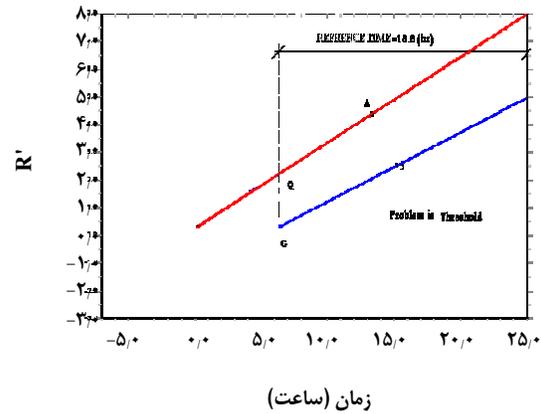
$$TRR = \frac{TSAT_{AFP} - TSAT_{BFP}}{TSAT_{BFP}} = \quad (۶)$$

$$\frac{۱۵/۴ - ۱۱/۴۸}{۱۱/۴۸} = ۰/۳۴۱ \text{ یا } ۳۴/۱$$

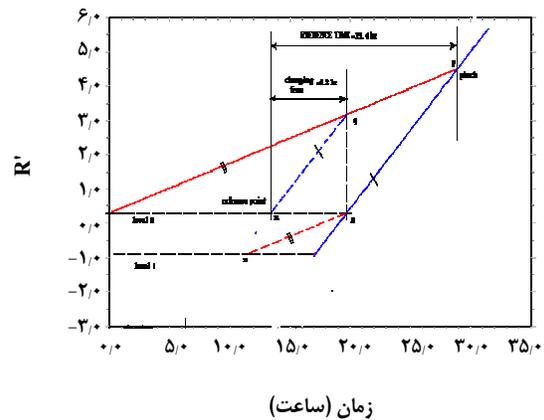
به عبارت دیگر به ازای زمان فعالیت یکسان یک مجموعه صنعتی تولید فراورده‌های لبنی نسبت تعداد دفعات رسوب زدایی سیستم بعد از به کار بردن روش پینچ رسوب به قبل از اعمال این روش برابر سه به چهار است. لذا هزینه‌های رسوب بعد از اعمال روش پینچ رسوب سه چهارم این هزینه قبل از اعمال روش مذکور است. به عبارت دیگر ۲۵ درصد کاهش هزینه‌های ناشی از رسوب با به کار بردن روش پینچ رسوب به دست می‌آید.

لازم به ذکر است که برای تعویض جریان‌ها (جریان B با E و جریان C با F) نیاز به شبکه لوله‌کشی و اجزای کنترلی اضافی است که این تجهیزات هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملکردی اضافی تحمیل می‌کند. با بررسی اثر متقابل بین هزینه‌های اضافی، تحمیلی و کاهش هزینه ناشی از اعمال روش پینچ رسوب، می‌توان بهترین تصمیم را گرفت.

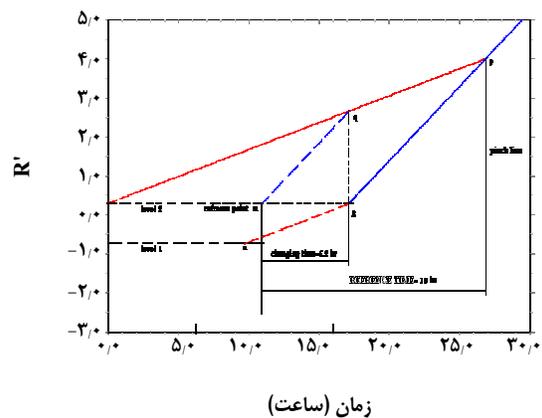
بر اساس پژوهش منتشر شده توسط *Van Asselt* و همکاران [۱۶] هزینه رسوب‌زدایی تجهیزات ۸۰ درصد کل هزینه تولید است. برای بررسی اقتصادی و کاهش هزینه به عنوان مثال هزینه تولید فراورده‌های لبنی کشور کانادا مورد بررسی قرار می‌گیرد. بخش لبنی در کانادا بعد از تولید غلات و گوشت قرمز در جایگاه سوم صنعت کشاورزی قرار دارد. درآمد خالص نقدی کل بخش‌های لبنی در سال ۲۰۰۰ میلادی برابر ۴/۱ بیلیون دلار بود [۱۷]. با فرض اینکه هزینه تولید ۳۰ درصد کل سود حاصله باشد، و با توجه به اینکه ۸۰ درصد هزینه‌ها ناشی از رسوب‌گذاری مبدل‌های حرارتی است [۱۶] می‌توان هزینه‌های ناشی از رسوب‌گذاری در صنایع لبنی را ۰/۹۸۴ بیلیون دلار تخمین زد. در مثال قبل کاهش ۲۵ درصدی در هزینه‌های ناشی از رسوب به دست آمد که این مقدار معادل ۰/۲۴۶ بیلیون دلار کاهش هزینه تولید محصول‌های لبنی در کشور کانادا است. این مقدار برابر ۶ درصد کل درآمد بخش لبنی در کانادا است، که بسیار قابل توجه و ارزشمند می‌باشد.



شکل ۱۲- منحنی مقاومت ظاهری بر حسب زمان برای زوج - جریان B/A.



شکل ۱۳- منحنی مقاومت ظاهری بر حسب زمان برای زوج - جریان C/F.



شکل ۱۴- منحنی مقاومت ظاهری بر حسب زمان برای زوج - جریان B/E.

روش پینچ رسوب در کارخانه‌ها و واحدهایی که هزینه رسوب‌زدایی آنها بسیار بالاست؛ می‌تواند مورد استفاده واقع شود.

جدول ۸ - زمان مبنای فعالیت برای زوج - جریان‌ها به دست آمده از روش پینچ رسوب و سیمپلکس.

زوج - جریان‌ها	زمان مبنای به دست آمده از روش پینچ رسوب	زمان مبنای به دست آمده از روش سیمپلکس
D/A	۱۸٫۸ h	۱۸٫۸ h
B/E	۱۶ h	۱۶٫۲ h
F/C	۱۵٫۴ h	۱۵٫۶ h

### نمادها

Ex i	مبدل حرارتی نام
F	ضریب رسوب، $\text{kW/m}^2\text{K}$
R	مقاومت رسوب $\text{kW/m}^2\text{K}$
$R^\circ$	مقاومت رسوب مجانبی $\text{kW/m}^2\text{K}$
R'	مقاومت ظاهری رسوب
t	زمان، h
TSAT	زمان فعالیت کل سیستم، h
$\tau$	زمان میرایی تشکیل رسوب، h

### زیرنویس‌ها

ave	مقدار متوسط
AFP	بعد از اعمال روش پینچ رسوب
BFP	بعد از اعمال روش پینچ رسوب
ff	تند رسوب
final	مقدار نهایی
i	جریان i
sf	کند رسوب

### نتیجه‌گیری

روش گرافیکی نوین با عنوان پینچ رسوب برای افزایش مدت زمانی که شبکه مبدل‌های حرارتی بدون نیاز به انجام فرایند رسوب‌گذاری نوین انتقال حرارت دلخواه را انجام دهد، پیشنهاد شده است. در این روش جریان‌های با نرخ رسوب‌گذاری بیشتر با جریان‌های با نرخ رسوب‌گذاری کمتر در بین مبدل‌های حرارتی گوناگون جایگزین می‌شوند تا فرصت بیشتری به کل شبکه مبدل‌های حرارتی جهت رسوب‌گذاری داده شود؛ یعنی بازه‌ی زمانی رسوب‌گذاری شبکه مبدل‌های حرارتی افزایش پیدا کرده و در نتیجه آن تعداد دفعات تمیزکاری و زمان توقف تولید کاهش می‌یابد. این روش زمان و مکان جایگزینی جریان‌ها را به طریق گرافیکی در اختیار قرار می‌دهد. البته دماهای خروجی جریان‌های مبدل‌های حرارتی باید در محدوده از پیش تعریف شده قرار بگیرند.

تاریخ دریافت: ۱۳۸۸/۷/۱۱ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۰/۳/۳۰

### مراجع

- [1] Hohmann EC., Optimum Networks for Heat Exchange. PhD Thesis, Chemical Engineering Department, University of Southern California, Los Angeles, USA, (1971).
- [2] Linnhoff B., Townsend D.W., Boland D., Hewitt G.F., Thomas B.E.A., GUY A.R., ET A.L., "User Guide in Process Integration for Efficient Use of Energy", Rugby: Institute of Chemical Engineers; (1982).
- [3] Linnhoff B., Hindmarsh E., The Pinch Design Method of Heat Exchanger Networks, *Chem. Eng. Sci.*, **38**, p. 745 (1983).
- [4] Taborek J., Akoi T., Ritter R.B., Palen J.W., Fouling: The Major Unresolved Problem in Heat Transfer, *Chem. Eng. Prog.*, **68**, p. 59 (1972).
- [5] Epstein N., "Fouling of Heat Transfer Equipment", Hemisphere, New York (1978).
- [6] Casado E., Model Optimizes Exchanger Cleaning, *Hydrocarbon Process*, **69**(8), pp. 71-78 (1990).

- [7] Wang L, Sunden B., Detailed Simulation of Heat Exchanger Networks for Flexibility Consideration, *Appl. Therm. Eng.*, **21**(12), p. 1175 (2001).
- [8] Sanaye S., Niroomand B., Simulation of Heat Exchanger Network (HEN) and Planning the Optimum Cleaning Schedule, *Energy Conversion and Management*, **48**, p. 1450 (2007).
- [9] Yeap B.L., Wilson D.I., Polley G.T., Pugh S.J., Mitigation of Crude Oil Refinery Heat Exchanger Fouling Through Retrofits Based on Thermo-Hydraulic Fouling Models, *Chemical Engineering Research and Design*, (82), p. 53 (2004).
- [10] Polley G.T., Wilson D.I., Yeap B.L., Pugh S.J., Evaluation of Laboratory Crude Oil Threshold Fouling Data for Application to Refinery Pre-Heat Trains, *Applied Thermal Engineering*, **22**, p. 777 (2002).
- [11] Yang M., Crittenden B., Fouling Thresholds in Bare Tubes and Tubes Fitted with Inserts, *Applied Energy*, **89**, p. 67 (2012).
- [12] Bani Kananeha A., Scharnbecka E., Kückb U.D., Rübigerb N., Reduction of Milk Fouling Inside Gasketed Plate Heat Exchanger Using Nano-Coatings, *Food and Bioproducts Processing*, **88**, p. 349 (2010).
- [13] Rao, Singiresa S, "Engineering Optimization, Theory and Practice", John Willy, (1996).
- [14] Mana Z.A., TAN Y.L., Foo D.C.Y., Targeting the Minimum Water Flowrate Using Water Cascade Analysis Technique. *J Am Inst Chem Eng.*, **50**, p. 3169 (2004).
- [15] Almutlaq A.M., Kazantzi V., El-Halwagi M.M., An Algebraic Approach to Targeting Waste Discharge and Impure Fresh Usage via Material Recycle/Reuse Network, *Clean Technol Environ Policy*, **7**, p. 294 (2005).
- [16] van Asselt A.J., Vissers M.M.M., Smit F., de Jong P., In-line control of Fouling. Proceedings of Heat Exchanger Fouling and Cleaning-Challenges and Opportunities, Kloster Irsee, Germany; June 5-10; New York U.S.A.; Engineering Conferences International (2005).
- [17] <http://animsci.agrenv.mcgill.ca/courses/450/topics/1.html>