

## تخمین پروفیل رسوب در لوله‌های دیگ‌بخار با استفاده از روش انتقال حرارت معکوس، جریان آرام

یکی از عوامل مؤثر در کاهش راندمان دیگ‌های بخار در طول دوره کارکرد رسوب است. رسوب به صورت یک لایه بر روی سطوح انتقال حرارت دیگ‌بخار می‌نشیند و در اثر مقاومت حرارتی که ایجاد می‌کند راندمان حرارتی دیگ‌بخار را کاهش می‌دهد. به همین دلیل تشخیص میزان رسوب و اندازه‌گیری دقیق آن در لوله‌های دیگ‌بخار از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است، با اندازه‌گیری دقیق رسوب می‌توان زمان عملیات رسوب‌زدایی را تعیین کرد. در این مقاله فرض بر این است که هیچ اطلاعی در رابطه با نحوه توزیع رسوب در لوله‌های دیگ بخار موجود نیست، لذا پروفیل رسوب با استفاده از شبیه‌سازی دما در دیواره داخلی لوله‌های دیگ بخار و همچنین استفاده از روش گرادیان مزدوج تخمین زده شده است. در این روش میزان خطای حاصل از تخمین تابع پروفیل رسوب چند ضابطه‌ای  $error = 0.00074$  محاسبه شد، این بیانگر دقت بالای روش گرادیان مزدوج در تخمین رسوب می‌باشد. بنابراین می‌توان از این روش به عنوان یک سیستم هشدار دهنده برای تمیزکاری لوله‌های دیگ بخار زمانی که میزان رسوب از یک مقدار تعیین شده بیشتر شده باشد، استفاده کرد.

مریم بهرامی<sup>۱</sup>

دانشجوی کارشناسی ارشد

کوروش گودرزی<sup>۲</sup>

دانشیار

امین موسائی<sup>۳</sup>

دانشیار

واژه‌های راهنما: دیگ‌بخار، رسوب، روش انتقال حرارت معکوس، گرادیان مزدوج، جریان آرام

### ۱- مقدمه

رسوب یکی از پارامترهای بسیار تاثیر گذار در عملکرد مبدل‌های حرارتی بویژه دیگ‌های بخار می‌باشد. بنابراین تشخیص و شناسایی رسوب در مبدل‌های حرارتی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است. به همین دلیل تا به امروز محققان پژوهش‌های زیادی در زمینه رسوب و نحوه اندازه‌گیری آن و تعیین زمان مناسب رسوب‌زدایی انجام داده‌اند. کارنوگورسیا و همکاران [۱] روشی را برای تخمین ضخامت رسوب ته‌نشین شده روی سطوح داخلی لوله‌های کولرگازی ارائه کردند. در این روش به منظور تخمین ضخامت رسوب نیازی به باز کردن کولر نیست، زیرا این روش براساس اندازه‌گیری درجه خنک‌کنندگی گاز (یعنی اختلاف دمای گاز ورودی و خروجی کولر) است.

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد تبدیل انرژی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یاسوج maryambahrami.su.ac@gmail.com

<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه یاسوج kgoudarzi@yu.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه یاسوج moosaie@yu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۷/۱۲/۱۲، تاریخ پذیرش: ۹۸/۱۰/۲۲

در این پژوهش آنها ضریب هدایت حرارتی رسوب که بیان کننده عملیات کولر بصورت تابعی از ضخامت گذاری رسوب است را بصورت تجربی بدست آوردند، و برای یک کولر CH-R که در حال کار کردن در ایستگاه KSO1 اسلواکی بود، نموداری برای ضخامت رسوب بر حسب درجه خنک کنندگی گاز ارائه دادند. لنیچ و همکاران [۲] یک مدل ریاضی دو بعدی گذرا برای پیش‌بینی رسوب در یک مبدل حرارتی با لوله های پرره‌دار ارائه کردند، که این مدل ریاضی براساس معادلات حاکم بر لایه مرزی که شامل ریز دانه‌های هوا و رسوب می‌باشد و همچنین با اعمال شرایط مرزی در سطح میان رسوب و هوا، تعریف شد. سپس این مدل ریاضی با استفاده از روش حجم محدود و با اعمال شرایط مرزی و اولیه و سپس گسسته سازی معادلات و استفاده از الگوریتم سیمپلر برای سرعت و فشار حل شد. نتایج حاصل از تحقیق آنها نشان داد که لایه رسوب تشکیل شده به میزان زیادی تحت تاثیر انتقال حرارت بین هوا و پره است.

سقات الاسلامی و همکاران [۳] در یک پژوهش فرایند ایجاد رسوب در یک مبدل حرارتی را با استفاده از توابع UDF<sup>1</sup> و برنامه C++ بوسیله نرم افزار فلونت شبیه‌سازی کردند. آنها اثر حضور جریان روی رسوب سولفات کلسیم در مبدل حرارتی و همچنین اثر عملکرد دامنه‌های مختلف از نوسانات و فرکانس‌ها را بر روی تشکیل رسوب بررسی کردند. واله‌یوبر و همکاران [۴] روش‌های مختلف نظارت بر تشکیل رسوب در مبدل‌های حرارتی را مورد مطالعه قرار دادند و این روش‌ها را با یکدیگر مقایسه کردند. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های تجربی و عددی اشاره کرد. لالوت و همکاران [۵] با استفاده از تکنیک شبکه عصبی، تشکیل رسوب در یک مبدل حرارتی با جریان متقاطع را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه آنها به منظور ثبت اطلاعات مبدل حرارتی هنگامی که سطوح مبدل حرارتی تمیز است و هنگامی که روی سطوح انتقال حرارت مبدل حرارتی رسوب تشکیل شده است، از یک مدل عددی استفاده کردند. در گام نخست، با شبیه سازی یک مبدل حرارتی تمیز، مدلی جهت تولید یک سری زمانی بکار برده شد، سپس صد مجموعه داده با استفاده از شبیه سازی یک مبدل حرارتی رسوب گذاری شده ایجاد شد. سرانجام با بررسی این نتایج به این نتیجه رسیدند که می‌توان بدون هیچ خطاری از تست کاسوم برای بررسی رسوب در مبدل‌های حرارتی استفاده کرد. موهانتی و همکاران [۶] به منظور نظارت بر تشکیل رسوب در یک مبدل حرارتی پوسته ولوله از فاکتور C استفاده کردند. آنها از فاکتور C به عنوان ابزاری برای بررسی عملکرد مبدل حرارتی با توجه به رسوبی که در مبدل حرارتی تشکیل شده است استفاده کردند فاکتور C ابتدا در طی دوره تمیز کردن محاسبه می‌شود و سپس با مقدار تمیز و مقدار طراحی مقایسه می‌شود و در نتیجه اطلاعاتی در رابطه با حد نهایی رشد رسوب بر روی سطوح انتقال حرارت مبدل حرارتی بدست آوردند.

در مطالعه آنها پارامترهای رسوب بوسیله اندازه گیری نرخ سرعت و افت فشار پیش بینی شد. نتایج آنها نشان داد که ابزار پیشنهادی در تشخیص رشد رسوب و کاهش راندمان حرارتی مبدل حرارتی بسیار موثر است. این روش راهکارهایی را برای، تشخیص زمان مناسب رسوب زدایی و جلوگیری از کاهش راندمان حرارتی که بر اثر تشکیل رسوب در مبدل‌های حرارتی بوجود می‌آید ارائه داد. جانسون و همکاران [۷] به تشخیص رسوب در مبدل‌های حرارتی با استفاده از فیلترینگ کالمن تعمیم یافته پرداختند. آنها از مدل‌های حالت فضایی غیرخطی به منظور تشخیص آنلاین رسوب در مبدل‌های حرارتی در حال کار استفاده کردند.

<sup>1</sup> User Defined Functions

در این روش زمانی که مبدل حرارتی در حالت کار کردن است، می‌توان رسوب را تشخیص داد. لذا به‌منظور بهینه‌سازی فیلتر کالمن ابتدا برای اندازه‌گیری از یک مدل حرارتی تمیز با جریان در خلاف جهت هم استفاده شد، سپس سایر اندازه‌گیری‌ها در شرایط حضور رسوب روی سطوح مبدل حرارتی محاسبه شد. نتایج بدست آمده از مطالعه آنها نشان داد که این روش در تشخیص رسوب بسیار حساس است، از این رو برای تشخیص رسوب در مبدل‌های حرارتی بسیار مناسب است.

دلروت و همکاران [۸] با استفاده از یک ناظر از نوع تاکاگی - سوگنو به تشخیص پروفیل رسوب در مبدل‌های حرارتی با ورودی چند جمله‌ای‌های نامشخص پرداختند. اساس این روش مدل‌سازی سیستم در یک ارائه فازی تاکاگی - سوگنو است، که از یک مدل‌سازی فیزیکی بدست آمده است. بدین منظور برای طراحی ناظر فازی با ورودی‌های نامشخص از نوع چند جمله‌ای‌ها از فرمول  $LMI^1$  استفاده شد. از جمله مزایای این روش این بود که به شرایط عملیاتی خاص مانند رژیم حالت پایدار و یا سنسورهای خاصی به استثنای موارد استاندارد نیاز نبود. مرهب و همکاران [۹] با استفاده از یک تکنیک صوتی جدید رسوب تشکیل شده درون مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای را مورد بررسی قرار دادند. آنها با انتشار امواج فرکانس پایین، بر روی سطوح مبدل حرارتی صفحه‌ای و بررسی توان و فرکانس موج بازگشتی و همچنین با در نظر گرفتن شاخص‌های رسوب و تحلیل کامپیوتری آن‌ها، به شناسایی پروفیل رسوب پرداختند. آنها نشان دادند که رسوب تشکیل شده در مبدل حرارتی صفحه‌ای به امواج صوتی با فرکانس پایین بسیار حساس است، لذا از این شیوه به عنوان روشی برای تشخیص آنلاین نرخ رسوب‌گذاری استفاده کردند. چن و یانگ [۱۰] با استفاده از اندازه‌گیری دمای مجرایی که سیال از آن عبور می‌کند و بکارگیری روش گرادیان مزدوج بر پایه الگوریتم معکوس، توانستند تخمین مناسبی را برای پروفیل رسوب شکل گرفته در مبدل حرارتی در حال کارکرد بدست آورند. بدین منظور آنها نتایج بدست آمده از این روش را با نتایج بدست آمده از جداسازی مجرای سیستم و اندازه‌گیری ضخامت رسوب، مقایسه کردند. دلموته و همکاران [۱۱] با استفاده از چند جمله‌ای مبهم تاکاگی سوگنو، تخمینی برای فاکتور رسوب (مقاومت رسوبی) یافتند. آنها یافتند که در حل با این روش هرچه تعداد قسمت‌های محاسباتی بیشتر باشد دقت بالاتر است. با این حال، حجم محاسبات بسیار سنگین می‌شود. از این رو، قسمت محاسباتی بهینه برای مبدل‌های جریان مخالف را به دو قسمت تقسیم کردند و در پایان، با داده‌های سیال ورودی، مشخصه ورودی و دمای خروجی رسوب ته‌نشین شده را تحلیل نمودند.

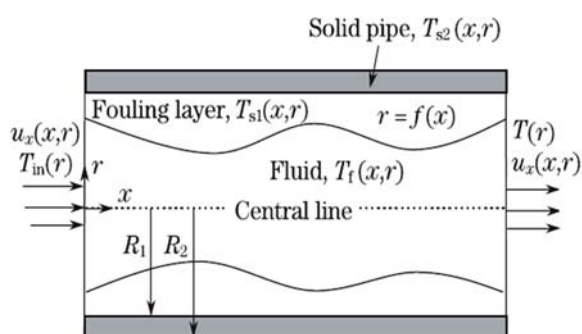
آدلی و همکاران [۱۲] طی یک فرایند تجربی و تئوری با استفاده از الگوریتم گوس- نیوتن خواص ترموفیزیکی رسوب ته‌نشین شده بر روی یک قسمت از مبدل حرارتی را تخمین زدند و اثرات آن را بر روی راندمان مبدل حرارتی بررسی کردند. در مطالعه آنها دمای پاسخ روی سطح بالایی یک سیستم دولایه (بخشی از مبدل حرارتی و رسوبی که بر روی آن تشکیل می‌شود و شار حرارتی که بصورت عرضی از روی سطح آن عبور می‌کند) اندازه‌گیری شد و دمای تئوری که تابعی از خواص ترموفیزیکی مجهول سیستم دو لایه بود، با استفاده از فرمول کوآدرپل و حل یک بعدی مسئله هدایت معکوس محاسبه شد.

<sup>1</sup> Linear Matrix Inequality

آدی لی و همکاران [۱۳] در مطالعه‌ای دیگر، در یک روش تجربی با استفاده از الگوریتم ژنتیکی، خواص ترموفیزیکی رسوب ته‌نشین شده بر روی سطح داخلی لوله‌های یک مبدل حرارتی را تخمین زدند. آنها از یک روش فوتونرمال با یک پالس تحریک حرارت عرضی محدود استفاده کردند، و سپس به منظور کمینه کردن درجه حرارت اندازه‌گیری و محاسبه شده از الگوریتم ژنتیک استفاده کردند، همچنین دما را که تابعی از خواص ترموفیزیکی نامشخص سیستم دولایه‌ای است، با استفاده از فرمول چهار قطبی و حل یک بعدی مسئله هدایت معکوس خطی محاسبه کردند. نتایج حاصل از تخمین خواص ترموفیزیکی رسوب با استفاده از الگوریتم ژنتیک از یک سو دقت و از سوی دیگر بازده و ثبات این الگوریتم را در تخمین خواص ترموفیزیکی رسوب نشان داد. همان‌گونه که مشهود است، در اکثر پژوهش‌ها که در مورد رسوب بر روی سطوح انتقال حرارت انجام گرفته است، محققان با به کارگیری روش‌های تجربی به اندازه‌گیری و شناسایی پروفیل رسوب در داخل لوله پرداختند، در این پژوهش با استفاده از روش انتقال حرارت معکوس پروفیل رسوب تشکیل شده در لوله‌های دیگ بخار با استفاده از کدنویسی متلب و روش عددی تفاضل محدود تخمین زده می‌شود.

## ۲- تحلیل

در این مقاله هدف تخمین پروفیل رسوب در یک دیگ بخار واتر تیوپ با استفاده از روش انتقال حرارت معکوس گرادیان مزدوج می‌باشد، با توجه به شرایط یکسان لوله‌های دیگ بخار تنها یک لوله مورد مطالعه قرار می‌گیرد، بنابراین یک لوله صاف و ساده که با یک هوای گرم در تماس است را به عنوان دیگ بخار واتر تیوپ در نظر می‌گیریم، سیال عامل را آب و محلول رسوب‌گذار را کلسیم سولفات در نظر گرفته و فرض می‌کنیم جریان آرام و تراکم ناپذیر و مسئله در حالت دائم و توسعه یافته می‌باشد، در ضمن دیگ بخار انتخابی به گونه‌ای است که در آن جوشش رخ نداده و از انتقال حرارت بواسطه تابش نیز صرفه نظر شده است. همانطور که از شکل (۱) مشاهده می‌شود در مسئله تخمین رسوب در لوله‌های دیگ بخار فرض بر این است که لوله‌های دیگ بخار نسبت به مرکز متقارن باشند. طول لوله‌های دیگ بخار  $L$  و شعاع دیوارهای داخلی و خارجی بترتیب  $R_1$  و  $R_2$  و دمای سیال ورودی  $T_{in}(r)$  می‌باشد فرض شده که پس از یک دوره کارکرد، یک لایه رسوب بر روی دیوار داخلی لوله‌های دیگ بخار تشکیل می‌شود، که پروفیل این رسوب نامشخص و بصورت تابعی از  $f(x)$  می‌باشد.



شکل ۱- شماتیکی از لوله‌های دیگ بخار [۱۰]

در مسئله مورد نظر علاوه بر مجهول بودن تابع پروفیل رسوب نحوه توزیع دما در سه ناحیه سیال، رسوب و دیواره لوله نیز نامشخص می‌باشد. بنابراین با در اختیار داشتن دمای یک یا چند نقطه از دیواره لوله‌های دیگ بخار مسئله از نوع انتقال حرارت معکوس می‌شود و می‌توان با استفاده از روش انتقال حرارت معکوس پروفیل رسوب را محاسبه کرد. در این مقاله ابتدا با استفاده از شبیه‌سازی دمایی، دمای تعدادی از نقاط دیواره لوله را با استفاده از کد نویسی متلب و شبکه بندی تفاضل محدود، شبیه‌سازی و سپس با استفاده از روش انتقال حرارت معکوس (که در ادامه بتفضیل بیان شده است) تابع پروفیل رسوب با استفاده از شبکه بندی تفاضل محدود و کد نویسی متلب تخمین زده شد، که مراحل روش انتقال حرارت معکوس  $CGM$  به شرح زیر می‌باشد:

## ۲-۱- مسئله مستقیم

در این روش تابع  $f(x)$  را مشخص فرض کرده و سپس به منظور تخمین تابع رسوب، توزیع دما در سه ناحیه سیال، رسوب و دیواره لوله‌ها با استفاده از روابط زیر بدست می‌آید:

معادله پیوستگی :

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_r}{r} + \frac{\partial v_x}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

معادله مومنوم:

$$\rho(v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x}) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \mu(\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial x^2}) \quad (2)$$

$$\rho(v_r \frac{\partial v_x}{\partial r} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu(\frac{\partial^2 v_x}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2}) \quad (3)$$

که شرایط مرزی آن بصورت زیر می‌باشد:

$$\text{at } x=0 \text{ and } 0 \leq r \leq f(x)$$

$$v_0 = 2\bar{V} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R_1} \right)^2 \right], v_r = 0 \quad (4)$$

$$\text{at } x=L \text{ and } 0 \leq r \leq f(x) \quad \frac{\partial v_x}{\partial x} = \frac{\partial v_r}{\partial x} \quad (5)$$

$$\text{at } 0 \leq x \leq L \text{ and } r=0 \quad \frac{\partial v_x}{\partial r} = v_r = 0 \quad (6)$$

$$\text{at } 0 \leq x \leq L \text{ and } r=f(x) \quad v_x = v_r = 0 \quad (7)$$

معادله انرژی برای نواحی مختلف مسئله مورد بررسی:  
ناحیه سیال:

$$\alpha_f \left( \frac{\partial^2 T_f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_f}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} \right) = \left( v_r \frac{\partial T_f}{\partial r} + v_x \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) \quad (۸)$$

$$\text{at } x=0 \text{ and } 0 \leq r \leq f(x) \quad T_f = T_{in}(r) \quad (۹)$$

$$\text{at } x=L \text{ and } 0 \leq r \leq f(x) \quad \frac{\partial T_f}{\partial x} = 0 \quad (۱۰)$$

$$\text{at } 0 \leq x \leq L \text{ and } r=0 \quad \frac{\partial T_f}{\partial r} = 0 \quad (۱۱)$$

ناحیه رسوب:

$$\frac{\partial^2 T_{s1}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{s1}}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_{s1}}{\partial x^2} = 0 \quad (۱۲)$$

$$\text{at } x=0 \text{ and } f(x) \leq r \leq R_1 \quad \frac{\partial T_{s1}}{\partial x} = 0 \quad (۱۳)$$

$$\text{at } x=L \text{ and } f(x) \leq r \leq R_1 \quad \frac{\partial T_{s1}}{\partial x} = 0 \quad (۱۴)$$

ناحیه دیواره لوله:

$$\frac{\partial^2 T_{s2}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{s2}}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_{s2}}{\partial x^2} = 0 \quad (۱۵)$$

$$\text{at } x=0 \text{ and } f(x) \leq r \leq R_1 \quad \frac{\partial T_{s2}}{\partial x} = 0 \quad (۱۶)$$

$$\text{at } x=L \text{ and } f(x) \leq r \leq R_1 \quad \frac{\partial T_{s2}}{\partial x} = 0 \quad (۱۷)$$

$$\text{at } 0 \leq x \leq L \text{ and } r = R_2$$

$$-K_{s2} \frac{\partial T_{s2}}{\partial r} = h(T_{s2} - T_{\infty}) \quad (۱۸)$$

سطح مشترک سیال و رسوب:

$$\text{at } 0 \leq x \leq L \text{ and } r = f(x) \quad T_f = T_{s1} \quad (۱۹)$$

$$\text{at } 0 \leq x \leq L \text{ and } r = f(x)$$

$$k_f \frac{\partial T_f}{\partial n} = k_{s1} \frac{\partial T_{s1}}{\partial n} \quad (۲۰)$$

سطح مشترک رسوب و دیواره لوله:

$$\text{at } 0 \leq x \leq L \text{ and } r = R_1 \quad T_{s1} = T_{s2} \quad (۲۱)$$

$$\begin{aligned} & \text{at } 0 \leq x \leq L \quad \text{and} \quad r = R_1 \\ & k_{s1} \frac{\partial T_{s1}}{\partial r} = k_{s2} \frac{\partial T_{s2}}{\partial r} \end{aligned} \quad (22)$$

### ۲-۲- مسئله معکوس

هدف از حل مسئله معکوس، تخمین تابع پروفیل رسوب در حالتی می‌باشد که سایر پارامترهای موجود در معادلات (۱) تا (۲۲) مشخص هستند، بدین منظور اطلاعات دمایی مربوط به  $M$  نقطه از دیواره لوله که در طول  $Y = r_m$  قرار دارد را با استفاده از شبیه سازی دمایی محاسبه کرده و از آن به عنوان اطلاعات کمکی برای تخمین تابع رسوب استفاده می‌شود سپس پروفیل رسوب نامشخص در دامنه مسئله مورد نظر تخمین زده می‌شود. حل بدست آمده از مسئله معکوس به نحوی است که تابع زیر به حداقل مقدار خود برسد:

$$j(f(x)) = \sum_{i=1}^M (T_{s2}(x_i, r_m) - Y(x_i, r_m))^2 \quad (23)$$

در معادله (۲۳)،  $T_{s2}(x_i, r_m)$  و  $Y(x_i, r_m)$  بترتیب دمایی شبیه‌سازی شده و دمایی محاسبه شده از تکرار عددی در هر مرحله در مکان  $(x, r) = (x_i, r_m)$  می‌باشد.

### ۲-۳- مسئله حساسیت

مشتق جهتی دما در جهت انحراف تابع مجهول را بصورت تابع  $\Delta T(x, r)$  که تابع حساسیت نامیده می‌شود نمایش می‌دهند. برای محاسبه اندازه گام جستجو لازم است ابتدا تابع حساسیت محاسبه شود، که برای بدست آوردن مسئله حساسیت کافی است در معادلات (۱) تا (۲۳) به اندازه  $\Delta T(x, r)$  اغتشاش ایجاد شود، آنگاه در  $f(x)$  به اندازه  $\Delta f(x)$  تغییر ایجاد می‌شود. بنابراین بجایگزین کردن  $T_f(x, r) + \Delta T_f(x, r)$  بجای  $T_f(x, r)$  و جایگزین کردن  $T_{s1}(x, r) + \Delta T_{s1}(x, r)$  بجای  $T_{s1}(x, r)$  و جایگزین کردن  $T_{s2}(x, r) + \Delta T_{s2}(x, r)$  بجای  $T_{s2}(x, r)$  و جایگزین کردن  $f(x) + \Delta f(x)$  بجای  $f(x)$  در مسئله مستقیم و کم کردن آن از مسئله مستقیم و صرفه نظر کردن از ترم‌های مرتبه دوم، مسئله حساسیت برای نواحی حل بصورت زیر بدست می‌آید:

ناحیه سیال:

$$\begin{aligned} & \alpha_f \left( \frac{\partial^2 \Delta T_f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Delta T_f}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Delta T_f}{\partial x^2} \right) = \\ & \left( v_r \frac{\partial \Delta T_f}{\partial r} + v_x \frac{\partial \Delta T_f}{\partial x} \right) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\text{at } x=0 \quad \text{and} \quad 0 \leq r \leq f(x) \quad \Delta T_f = 0 \quad (25)$$

$$\text{at } x=L \quad \text{and} \quad 0 \leq r \leq f(x) \quad \frac{\partial \Delta T_f}{\partial x} = 0 \quad (26)$$

$$\text{at } 0 \leq x \leq L \text{ and } r=0 \quad \frac{\partial \Delta T_f}{\partial r} = 0 \quad (27)$$

ناحیه رسوب:

$$\frac{\partial^2 \Delta T_{s1}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Delta T_{s1}}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Delta T_{s1}}{\partial x^2} = 0 \quad (28)$$

$$\text{at } x=0 \text{ and } f(x) \leq r \leq R_1 \quad \frac{\partial \Delta T_{s1}}{\partial x} = 0 \quad (29)$$

$$\text{at } x=L \text{ and } f(x) \leq r \leq R_1 \quad \frac{\partial \Delta T_{s1}}{\partial x} = 0 \quad (30)$$

ناحیه دیواره لوله:

$$\frac{\partial^2 \Delta T_{s2}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Delta T_{s2}}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Delta T_{s2}}{\partial x^2} = 0 \quad (31)$$

$$\text{at } x=0 \text{ and } R_1 \leq r \leq R_2 \quad \frac{\partial \Delta T_{s2}}{\partial x} = 0 \quad (32)$$

$$\text{at } x=L \text{ and } R_1 \leq r \leq R_2 \quad \frac{\partial \Delta T_{s2}}{\partial x} = 0 \quad (33)$$

$$\text{at } 0 \leq x \leq L \text{ and } r = R_2$$

$$-K_{s2} \frac{\partial \Delta T_{s2}}{\partial r} = h \Delta T_{s2} \quad (34)$$

سطح مشترک سیال و رسوب:

$$\text{at } 0 \leq x \leq L \text{ and } r = f(x) \quad \Delta T_f = \Delta T_{s1} \quad (35)$$

$$\text{at } 0 \leq x \leq L \text{ and } r = f(x)$$

$$k_f \frac{\partial \Delta T_f}{\partial n} = k_{s1} \frac{\partial \Delta T_{s1}}{\partial n} \quad (36)$$

سطح مشترک رسوب و دیواره لوله:

$$\text{at } 0 \leq x \leq L \text{ and } r = R_1 \quad \Delta T_{s1} = \Delta T_{s2} \quad (37)$$

$$\text{at } 0 \leq x \leq L \text{ and } r = R_1$$

$$k_{s1} \frac{\partial \Delta T_{s1}}{\partial r} = k_{s2} \frac{\partial \Delta T_{s2}}{\partial r} \quad (38)$$

## ۲-۴- مسئله الحاقی

برای به دست آوردن مسئله الحاقی، معادلات مستقیم در ضرایب لاگرانژی (تابع الحاقی) ضرب می‌شوند، بدین منظور معادلات (۸) تا (۱۱) در ضریب لاگرانژی  $\lambda_f(x, r)$ ، معادلات (۱۲) تا (۱۴) را در ضریب لاگرانژی  $\lambda_{s1}(x, r)$  و معادلات (۱۵) تا (۱۸) را در ضریب لاگرانژی  $\lambda_{s2}(x, r)$  ضرب می‌شوند. سپس از عبارات بدست آمده بر روی مکان و دامنه مربوط به خود انتگرال گرفته و نتایج حاصل از آن به سمت راست معادله (۲۳) اضافه می‌کنیم، در نهایت تابع  $j(f(x))$  به صورت زیر محاسبه می‌شود:



$$\begin{aligned}
 j(f(x)) &= \sum_{i=1}^M (T_{s2}(x_i, r_m) - Y(x_i, r_m))^2 \\
 &+ \int_0^{f(x)L} \int_0^L r \lambda_f \left( v_r \frac{\partial T_f}{\partial r} + v_x \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) \\
 &- \alpha_f \left( \frac{\partial^2 T_f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_f}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_f}{\partial x^2} \right) dx dr \\
 &+ \int_{f(x)0}^{R_1 L} \int_0^L r \lambda_{s1} \left( \frac{\partial^2 T_{s1}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{s1}}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_{s1}}{\partial x^2} \right) dx dr \\
 &+ \int_{R_1 0}^{R_2 L} \int_0^L r \lambda_{s2} \left( \frac{\partial^2 T_{s2}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_{s2}}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_{s2}}{\partial x^2} \right) dx dr
 \end{aligned} \tag{۳۹}$$

سپس با جایگزین کردن  $T_f(x, r) + \Delta T_f(x, r)$  بجای  $T_f(x, r)$ ،  $T_{s1}(x, r) + \Delta T_{s1}(x, r)$  بجای  $T_{s1}(x, r)$  و  $T_{s2}(x, r) + \Delta T_{s2}(x, r)$  بجای  $T_{s2}(x, r)$  در معادلات (۸) تا (۱۱) و کم کردن (۳۹) و صرفه نظر کردن از ترم‌های مرتبه دوم، تابع  $\Delta J(f(x))$  را به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\begin{aligned}
 \Delta J(f(x)) &= \int_{R_1 0}^{R_2 L} \int_0^L 2 (T_{s2}(x, r) - Y(x, r)) \\
 &\Delta T_{s2} \delta(x - x_i) \delta(r - r_m) dx dr + \int_0^{f(x)L} \int_0^L r \lambda_f \\
 &\left( \alpha_f \left( \frac{\partial^2 \Delta T_f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Delta T_f}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Delta T_f}{\partial x^2} \right) \right. \\
 &\left. - \left( v_r \frac{\partial \Delta T_f}{\partial r} + v_x \frac{\partial \Delta T_f}{\partial x} \right) \right) dx dr + \int_{f(x)0}^{R_1 L} \int_0^L r \lambda_{s1} \\
 &\left( \frac{\partial^2 \Delta T_{s1}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Delta T_{s1}}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Delta T_{s1}}{\partial x^2} \right) dx dr + \\
 &\int_{R_1 0}^{R_2 L} \int_0^L r \lambda_{s2} \left( \frac{\partial^2 \Delta T_{s2}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Delta T_{s2}}{\partial r} + \frac{\partial^2 \Delta T_{s2}}{\partial x^2} \right) dx dr
 \end{aligned} \tag{۴۰}$$

که در رابطه (۴۰)،  $\delta$  تابع دلتا دیراک نامیده می‌شود. در این رابطه ابتدا انتگرال‌های دوگانه سمت راست را، از طریق انتگرال گیری جزء به جزء محاسبه و سپس از شرایط موجود در مسئله حساسیت استفاده کرده و  $\Delta J$  به سمت صفر میل داده می‌شود، به سمت صفر میل دادن عبارات‌های شامل  $\Delta T$  منجر به بدست آمدن توابع  $\lambda_f(x, r)$ ،  $\lambda_{s1}(x, r)$  و  $\lambda_{s2}(x, r)$  بصورت زیر می‌شود [۱۴]:

ناحیه سیال:

$$\begin{aligned}
 &\alpha_f \left( \frac{\partial^2 \lambda_f}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \lambda_f}{\partial r} + \frac{\partial^2 \lambda_f}{\partial x^2} \right) \\
 &+ \left( v_r \frac{\partial \lambda_f}{\partial r} + v_x \frac{\partial \lambda_f}{\partial x} \right) = 0
 \end{aligned} \tag{۴۱}$$

$$\text{at } x=0 \text{ and } 0 \leq r \leq f(x) \quad \lambda_f = 0 \quad (42)$$

$$\text{at } x=L \text{ and } 0 \leq r \leq f(x)$$

$$\alpha_f \frac{\partial \lambda_f}{\partial x} + v_x \lambda_f = 0 \quad (43)$$

$$\text{at } 0 \leq x \leq L \text{ and } r=0 \quad \frac{\partial \lambda_f}{\partial r} = 0 \quad (44)$$

ناحیه رسوب :

$$\frac{\partial^2 \lambda_{s1}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \lambda_{s1}}{\partial r} + \frac{\partial^2 \lambda_{s1}}{\partial x^2} = 0 \quad (45)$$

$$\text{at } x=0 \text{ and } f(x) \leq r \leq R_1 \quad \frac{\partial \lambda_{s1}}{\partial x} = 0 \quad (46)$$

$$\text{at } x=L \text{ and } f(x) \leq r \leq R_1 \quad \frac{\partial \lambda_{s1}}{\partial x} = 0 \quad (47)$$

ناحیه دیواره لوله :

$$\frac{\partial^2 \lambda_{s2}}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \lambda_{s2}}{\partial r} + \frac{\partial^2 \lambda_{s2}}{\partial x^2} + \left( \frac{2}{r} (T_{s2}(x, r) - Y(x, r)) \delta(x - x_i) \delta(r - r_m) \right) = 0 \quad (48)$$

$$\text{at } x=0 \text{ and } R_1 \leq r \leq R_2 \quad \frac{\partial \lambda_{s2}}{\partial x} = 0 \quad (49)$$

$$\text{at } x=L \text{ and } R_1 \leq r \leq R_2 \quad \frac{\partial \lambda_{s2}}{\partial x} = 0 \quad (50)$$

$$\text{at } 0 \leq x \leq L \text{ and } r = R_2$$

$$-K_{s2} \frac{\partial \lambda_{s2}}{\partial r} = h \lambda_{s2} \quad (51)$$

سطح مشترک سیال و رسوب :

$$\text{at } 0 \leq x \leq L \text{ and } r = f(x)$$

$$K_{s1} \lambda_f = K_f \lambda_{s1} \quad (52)$$

$$\text{at } 0 \leq x \leq L \text{ and } r = f(x)$$

$$k_{s1} \frac{\partial \lambda_f}{\partial n} = k_f \frac{\partial \lambda_{s1}}{\partial n} \quad (53)$$

سطح مشترک رسوب و دیواره لوله :

$$\text{at } 0 \leq x \leq L \text{ and } r = R_1$$

$$K_{s2} \lambda_{s1} = K_{s1} \lambda_{s2} \quad (54)$$

$$\text{at } 0 \leq x \leq L \text{ and } r = R_1 \quad \frac{\partial \lambda_{s1}}{\partial r} = \frac{\partial \lambda_{s2}}{\partial r} \quad (55)$$

بنابراین با بدست آمدن توابع  $\lambda_{s1}(x, r)$ ،  $\lambda_{s2}(x, r)$  و  $\lambda_f(x, r)$  می‌توان مسئله الحاقی را همانند مسئله مستقیم حل کرد.

## ۲-۵- معادله گرادیان

به منظور بدست آوردن جهت نزول و ضریب مزدوج، معادله گرادیان که بصورت زیر می‌باشد، حل می‌شود:

$$\Delta J(f(x)) = \int_0^L - \left( r \frac{\partial T_{s1}}{\partial n} \frac{\partial \lambda_{s1}}{\partial n} \right)_{r=f(x)} \Delta f(x) dx \quad (56)$$

برای حل این ترم انتگرالی فرض می‌شود که تابع مجهول  $f(x)$  به فضای توابع انتگرال پذیر مربعی تعلق دارد و سپس با استفاده از معادله (۵۷) میان  $\Delta J(f(x))$  و  $\nabla J(f(x))$  ارتباط برقرار می‌شود:

$$\Delta J(f(x)) = \int_0^L \nabla J(f(x)) \Delta f(x) dx \quad (57)$$

سپس با مقایسه معادلات (۵۶) و (۵۷)، رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\nabla J(f(x)) = J'(x) = - \left( r \frac{\partial T_{s1}}{\partial n} \frac{\partial \lambda_{s1}}{\partial n} \right)_{r=f(x)} \quad (58)$$

## ۲-۶- فرایند تکرار

در روش گرادیان مزدوج با مسئله الحاقی برای تخمین تابع، از فرایند تکرار با هدف کمینه کردن ترم  $J(f(x))$ ، استفاده می‌شود، که فرایند تکرار بصورت زیر می‌باشد:

$$f^{k+1}(x) = f^k(x) - \beta^k p^k(x) \quad (59)$$

$$k = 0, 1, 2, 3, \dots$$

که در رابطه (۵۹)،  $\beta^k$  اندازه گام جستجو و  $p^k(x)$  جهت نزول و بالا نویس  $k$  تعداد تکرار می‌باشد. جهت نزول در هر مرحله، بصورت ترکیبی از معادله گرادیان  $J(f(x))$  یعنی  $\nabla J(f^k(x))$  و حاصل ضرب ضریب مزدوج در جهت نزول تکرار قبلی می‌باشد که بصورت معادله (۶۰) محاسبه می‌شود:

$$p^k(x) = J'^k(x) + \gamma^k p^{k-1}(x) \quad (60)$$

در رابطه (۶۰)،  $\gamma^k$ ، ضریب مزدوج نامیده می‌شود، روش‌های مختلفی برای محاسبه ضریب مزدوج وجود دارد که در این مقاله ضریب مزدوج را براساس رابطه فلنچر ریوس، که بصورت زیر می‌باشد، محاسبه شده است:

$$\gamma^k = \frac{\sum_{i=1}^M (J'^k(x) \delta(x-x_i))^2}{\sum_{i=1}^M (J'^{k-1}(x) \delta(x-x_i))^2} \quad (61)$$

with  $\gamma^0 = 0$

برای همگرایی روند تکرار لازم است که تابع  $J(f(x))$  به حداقل مقدار خود برسد، بنابراین برای اجرای روند تکرار ابتدا باید اندازه گام جستجو  $\beta^k$  و سپس گرادیان تابع  $J'^k(x)$  را بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\beta^k = \frac{\sum_{i=1}^M \Delta T_{s2}(p^k) (T_{s2}(f^k) - Y(x_i, r_m))}{\sum_{i=1}^M (\Delta T_{s2}(p^k))^2} \quad (62)$$

برای تکرار مرحله  $K + 1$  ام می‌توان تابع  $J(f^{K+1}(x))$  را بصورت زیر باز نویسی کرد:

$$J(f^{K+1}(x)) = \sum_{i=1}^M (T_{s2}(f^k) - \beta^k \Delta T_{s2}(p^k) - Y(x_i, r_m))^2 \quad (63)$$

سرانجام پس از محاسبه اندازه گام جستجو  $\beta^k$ ، جهت نزول  $p^k(x)$  و ضریب مزدوج  $\gamma^k$ ، فرایند تکرار با استفاده از رابطه (۵۹) انجام می‌شود، تا اینکه سرانجام معیار همگرایی را ارضا کند.

## ۷-۲- معیار همگرایی

در صورتی که از اصل ناهمخوانی به عنوان معیار همگرایی، فرایند تکرار در روش گرادیان مزدوج با مسئله الحاقی برای تخمین تابع، استفاده شود، نتایج حاصل از روش گرادیان مزدوج قابل قبول است. این معیار همگرایی، بر اساس اصل ناهمخوانی یک تکرار منظم برای روش گرادیان مزدوج ایجاد می‌کند، که این معیار همگرایی بصورت زیر بیان می‌شود:

$$J(f(x)) < \varepsilon \quad (64)$$

در رابطه (۶۴)،  $\varepsilon$  معیار خطا است و به گونه‌ای انتخاب می‌شود که هنگام بکارگیری داده‌ها جواب‌های یکنواختی بدست آید. این جواب‌ها زمانی دقت کافی را دارند که شرط زیر برقرار باشد:

$$\varepsilon = M \sigma^2 \quad (65)$$

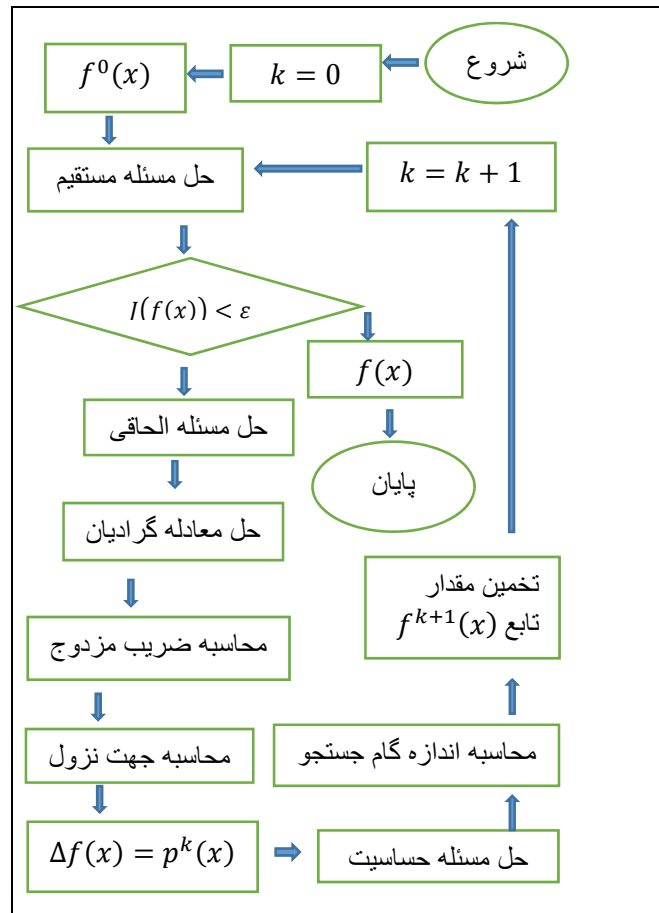
در رابطه (۶۵)،  $\sigma$  انحراف معیار خطاهای اندازه‌گیری شده می‌باشد، که بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$|Y(x_i, r_m) - T_{s2}(x_i, r_m)| \cong \sigma \quad (66)$$

مجموع فرایندهای بالا روش گرادیان مزدوج با مسئله الحاقی برای تخمین تابع، را نتیجه می‌دهد.

۸-۲- الگوریتم روش گرادیان مزدوج با مسئله الحاقی برای تخمین تابع پروفیل رسوب در لوله‌های دیگ بخار برای تخمین تابع پروفیل رسوب  $f(x)$  در لوله‌های دیگ بخار با استفاده از، روش گرادیان مزدوج با مسئله الحاقی از الگوریتم زیر استفاده می‌کنیم:

۱.  $f^k(x)$  به عنوان حدس اولیه برای تابع پروفیل رسوب  $f(x)$  در نظر گرفته می‌شود.
۲. با استفاده از معادلات (۸) تا (۲۳) مسئله مستقیم داده شده را حل کرده و توابع  $T_{s1}(x, r)$ ،  $T_f(x, r)$  و  $T_{s2}(x, r)$  بر حسب تابع  $f^k(x)$  محاسبه می‌شود.
۳. معیار همگرایی چک شود، اگر شرایط توقف ارضا شود تخمین تابع  $f(x)$  به پایان رسیده و به مرحله ۱۰ رفته در غیر این صورت باید به مرحله ۴ رفت.
۴. با دانستن دمای شبیه‌سازی شده  $Y(x_i, r_m)$ ،  $T_f(x, r)$ ،  $T_{s1}(x, r)$  و  $T_{s2}(x, r)$ ، مسئله الحاقی را حل کرده و سپس  $\lambda_f(x, r)$ ،  $\lambda_{s1}(x, r)$  و  $\lambda_{s2}(x, r)$  محاسبه می‌شود.
۵. با دانستن  $\lambda_f(x, r)$ ،  $\lambda_{s1}(x, r)$  و  $\lambda_{s2}(x, r)$ ،  $\nabla J(f^k(x))$  محاسبه می‌شود.
۶. با دانستن  $\nabla J(f^k(x))$ ،  $\gamma^k$  و همچنین جهت نزول  $P^k(x)$  محاسبه می‌شود.



۷. سپس  $\Delta p^k(x) = f^k(x)$  قرار داده، و برای محاسبه  $\Delta T_f(x, r)$  و  $\Delta T_{s1}(x, r)$  و  $\Delta T_{s2}(x, r)$  مسئله حساسیت حل می‌شود.

۸. با حل مسئله حساسیت اندازه گام جستجو را محاسبه شود.

۹. با دانستن  $P^k(x)$  و  $\beta^k$  تابع پروفیل رسوب جدید  $f^{k+1}(x)$  تخمین زده و به مرحله ۲ بازگردید.

۱۰. پایان

### ۳- نتایج و بحث

در این مقاله از روش انتقال حرارت معکوس گرادیان مزدوج با مسئله الحاقی برای تخمین تابع پروفیل رسوب در دیگبخار استفاده شده است. در این روش با در اختیار داشتن معادلات مستقیم، الحاقی و حساسیت و استفاده از زبان برنامه نویسی متلب و روش عددی تفاضل محدود و استفاده از الگوریتم گرادیان مزدوج با مسئله الحاقی تابع رسوب، برای مقادیر مختلف  $\sigma$  (تفاضل دمای واقعی و دمایی که بوسیله حل عددی بدست می‌آید) تخمین زده می‌شود، بدین منظور معادلات حاکم بر مسئله در فضای محاسباتی گسسته سازی و سپس نتایج آن که مستقل از نوع شبکه می‌باشند، به فضای فیزیکی انتقال داده شدند. در این مقاله فرض شده که مسئله نسبت به مرکز مجرا متقارن است، لذا برای حل مسئله معکوس تنها نیمه بالایی مجرا در نظر گرفته شده است. در این مطالعه جنس دیواره از فولاد و سیال عامل آب در نظر گرفته شده است، بنابراین خواص مواد، پارامترهای هندسی، و پارامترهای حرارتی مربوط به سیستم به شرح زیر ذکر می‌شود:

$$\alpha = 1.4 \times 10^{-7} (m^2 / s)$$

$$k_f = .5 (w / mK)$$

$$v = 8.9 \times 10^{-7} (m^2 / s)$$

$$k_{s1} = 2 (w / mK)$$

$$h_c = 10 (w / m^2 K)$$

$$k_{s2} = 42 (w / mK)$$

$$h = 100 (w / m^2 K)$$

$$R_1 = .08 (m)$$

$$T_{in} = 300 (K)$$

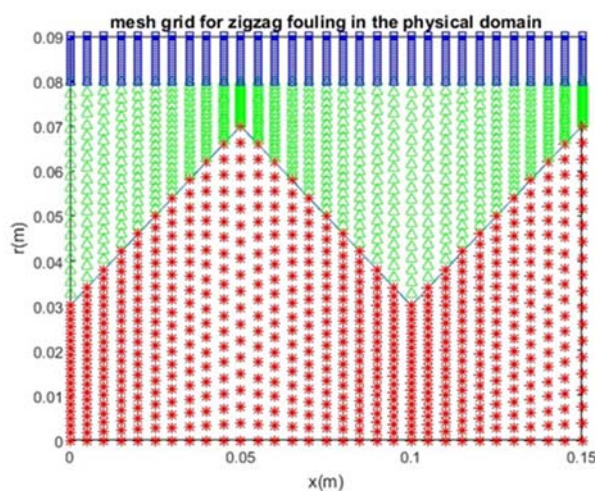
$$R_2 = .09 (m)$$

$$T_{\infty} = 600 (K)$$

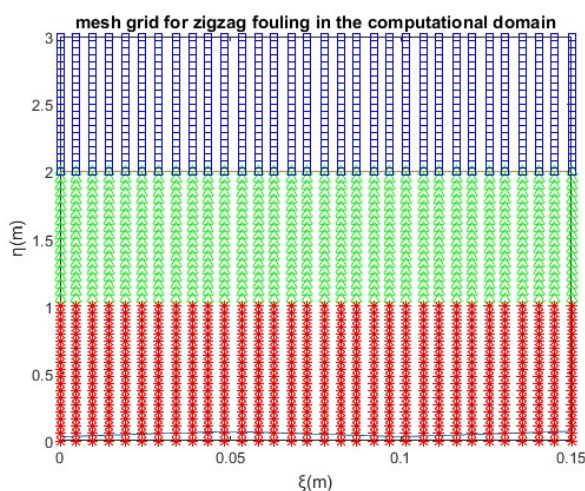
$$L = .15 (m)$$

به منظور سنجیدن دقت روش انتقال حرارت معکوس ارائه شده، پروفیل رسوب شبیه سازی شده در طول لوله های دیگ بخار بصورت معادله (۶۷) در نظر گرفته می شود:

$$f(x) = \begin{cases} 0.03 + 0.8 \times x & x \leq 0.05 \\ 0.07 - 0.8 \times (x - .05) & 0.05 \leq x \leq 0.1 \\ 0.03 + 0.8 \times (x - 0.1) & 0.1 \leq x \leq .15 \end{cases} \quad (67)$$



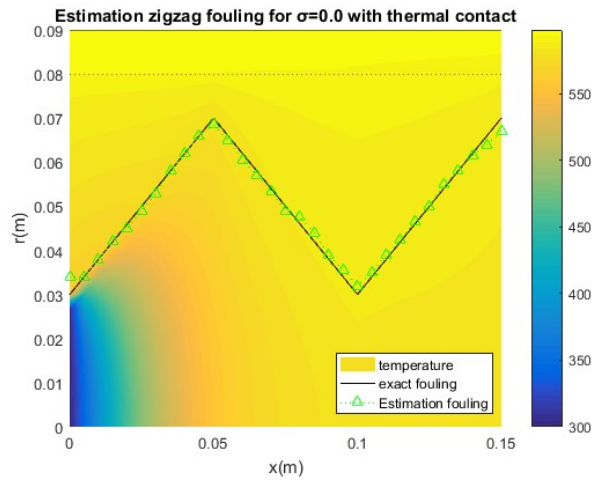
شکل ۲- شبکه بندی پروفیل رسوب در فضای فیزیکی



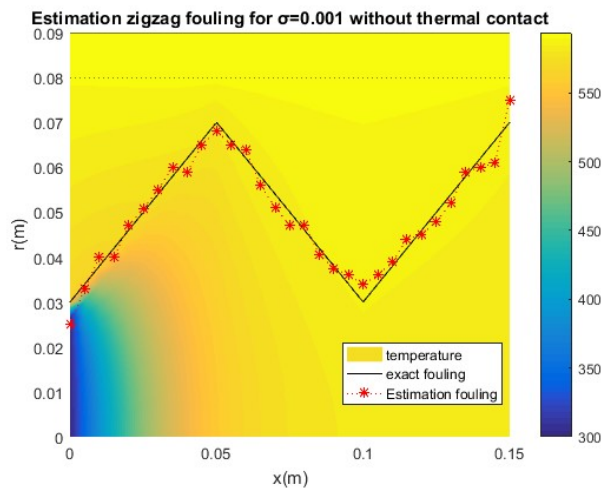
شکل ۳- شبکه بندی پروفیل رسوب در فضای محاسباتی

به منظور تخمین رسوب ابتدا ناحیه حل بصورت شکل (۲) در فضای فیزیکی شبکه بندی می‌شود، با توجه به اینکه این شبکه غیر مستطیل شکل و نامنظم است، برای حل راحت تر مطابق شکل (۳) شبکه به فضای محاسباتی نگاشت می‌شود. در این روش به منظور تخمین تابع پروفیل رسوب، ابتدا کانتور دما تخمین زده می‌شود، سپس تابع پروفیل رسوب تحت تاثیر افزایش مقدار  $\sigma$ ، افزایش سرعت ورودی سیال و افت فشار سیال در لوله تخمین زده می‌شود.

به منظور بررسی افزایش مقدار  $\sigma$  بر دقت روش  $CGM$  در تخمین تابع پروفیل رسوب، فرض بر این است که میزان افت فشار درون لوله های دیگ بخار  $(\frac{dp}{dx} = 1)$  و سرعت ورودی سیال به داخل لوله‌های دیگ بخار  $(u_0 = 0.1 \frac{cm}{s})$  مقداری ثابت است، که نتایج آن بشرح زیر است :



شکل ۴- تخمین پروفیل رسوب برای  $\sigma = 0$



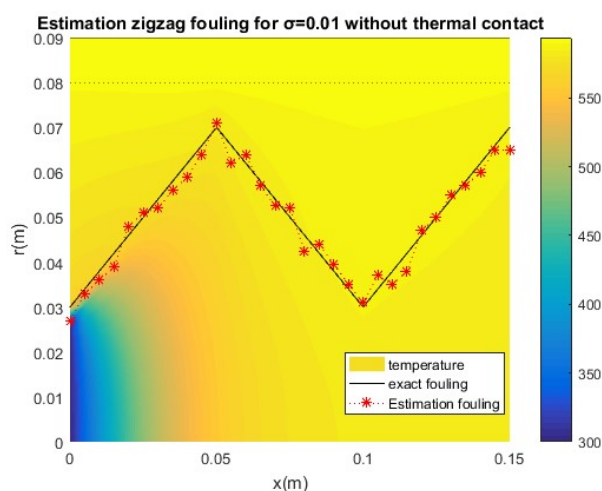
شکل ۵- تخمین رسوب برای  $\sigma = .001$

شکل (۴) کانتور دما و پروفیل رسوب تخمین زده شده با استفاده از روش  $CGM$  در  $\sigma = 0$  نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود داده‌های بدست آمده برای تخمین تابع پروفیل رسوب بسیار نزدیک به مقادیر واقعی تابع پروفیل رسوب می‌باشد، بنابراین می‌توان گفت روش گرادیان مزدوج با مسئله الحاقی برای تخمین تابع بسیار دقیق عمل می‌کند. البته در نقاط ابتدایی و انتهایی لوله نوسانات تابع پروفیل رسوب نسبت به سایر نقاط کمی بیشتر است که این امر به ماهیت روش انتقال حرارت معکوس برمی‌گردد، زیرا به هنگام تخمین یک تابع با استفاده از روش انتقال حرارت معکوس در نقاط مرزی نسبت به سایر نقاط تخمین بیشتری انجام می‌شود.

شکل (۵) کانتور دما و پروفیل رسوب تخمین زده شده با استفاده از روش  $CGM$  در  $\sigma = 0.001$  نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، چون بین دمایی واقعی و دمای تخمین زده شده کمی خطا ایجاد کرده‌ایم، تابع پروفیل رسوب تخمین زده شده در مقایسه با رسوب واقعی نوسانات بسیار ریزی پیدا می‌کند، اما با این وجود باز هم داده‌ها بسیار نزدیک به مقادیر واقعی تابع پروفیل رسوب می‌باشد، بنابراین می‌توان گفت در این مورد نیز روش گرادیان مزدوج با مسئله الحاقی برای تخمین تابع (روش  $CGM$ ) بسیار دقیق عمل می‌کند.

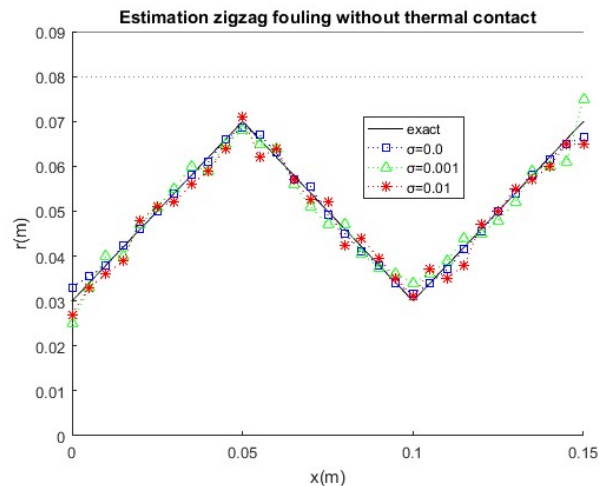
شکل (۶) کانتور دما و پروفیل رسوب تخمین زده شده با استفاده از روش  $CGM$  در  $\sigma = 0.01$  نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، چون میزان خطای ایجاد شده برای داده‌های دمایی بیشتر شده است، میزان نوسانات ایجاد شده، در تخمین تابع پروفیل رسوب نیز بیشتر شده است، اما با این وجود باز هم داده‌ها بسیار نزدیک به مقادیر واقعی تابع پروفیل رسوب می‌باشد، بنابراین می‌توان گفت در این مورد نیز روش گرادیان مزدوج با مسئله الحاقی برای تخمین تابع (روش  $CGM$ ) بسیار دقیق عمل می‌کند.

شکل (۷) به مقایسه توابع پروفیل رسوب تخمین زده شده با استفاده از روش انتقال حرارت معکوس  $CGM$ ، برای  $\sigma$  های مختلف می‌پردازد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار  $\sigma$  میزان دقت روش در تخمین تابع پروفیل رسوب کمی کاهش می‌یابد، اما در نهایت می‌توان گفت روش  $CGM$  در تخمین تابع پروفیل رسوب بسیار دقیق عمل می‌کند.



شکل ۶- تخمین رسوب برای  $\sigma = 0.01$



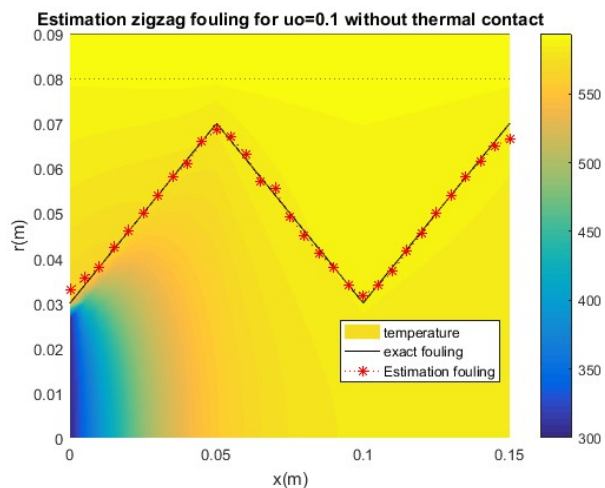

 شکل ۷- مقایسه تخمین رسوب، برای  $\sigma$  های مختلف

 جدول ۱- میزان دقت روش CGM در تخمین تابع پروفیل رسوب برای  $\sigma$  های مختلف

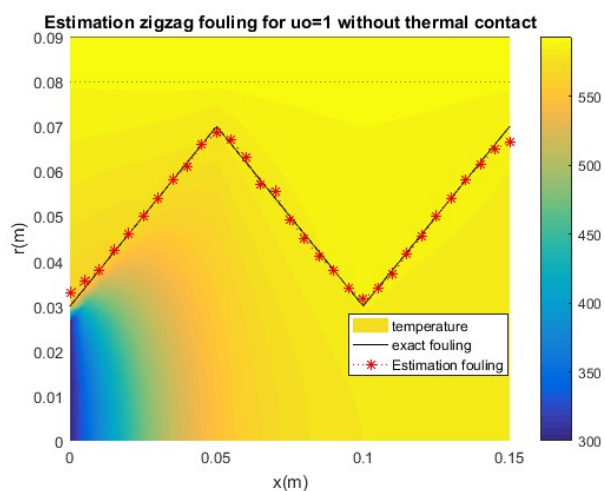
خطای اندازه گیری دما	تعداد تکرار	خطای جذر میانگین مربعات
۰	۴۵۳۴	۰,۰۰۰۷۴
۰,۰۰۱	۵۴۰۸	۰,۰۰۲۱
۰,۰۱	۶۱۲۳	۰,۰۰۲۳

جدول (۱) میزان دقت روش CGM در تخمین تابع پروفیل رسوب برای  $\sigma$  های مختلف، بیان می‌کند. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش خطا در دمای اندازه‌گیری شده میزان دقت روش CGM در تخمین تابع پروفیل رسوب کاهش می‌یابد.

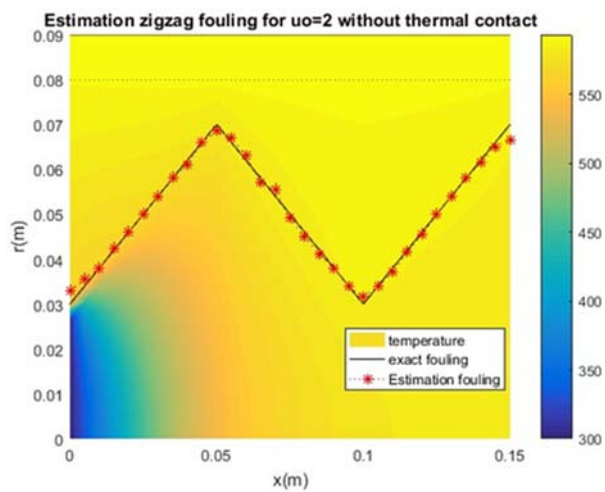
به منظور بررسی افزایش سرعت اولیه جریان ورودی به لوله‌های دیگ بخار بر دقت تخمین تابع پروفیل رسوب با استفاده از روش CGM، فرض بر این است که  $\sigma = 0.0$  و افت فشار درون لوله‌های دیگ بخار دارای مقدار ثابت  $\left(\frac{dp}{dx}\right) = 1$  است، سپس برای سرعت اولی  $u_0 = 0.1$  و  $u_0 = 1$  و  $u_0 = 2$  میزان پروفیل رسوب تخمین زده می‌شود. شکل (۸) و شکل (۹) و شکل (۱۰) به ترتیب پروفیل رسوب تخمین زده شده برای مقادیر  $u_0 = 0.1$ ،  $u_0 = 1$  و  $u_0 = 2$  نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود، داده‌های بدست آمده برای تخمین تابع پروفیل رسوب بسیار نزدیک به مقادیر واقعی تابع پروفیل رسوب می‌باشد، بنابراین می‌توان گفت روش گرادیان مزدوج با مسئله الحاقی برای تخمین تابع (روش CGM) بسیار دقیق عمل می‌کند. البته در نقاط ابتدایی و انتهای لوله نوسانات تابع پروفیل رسوب نسبت به سایر نقاط کمی بیشتر است.



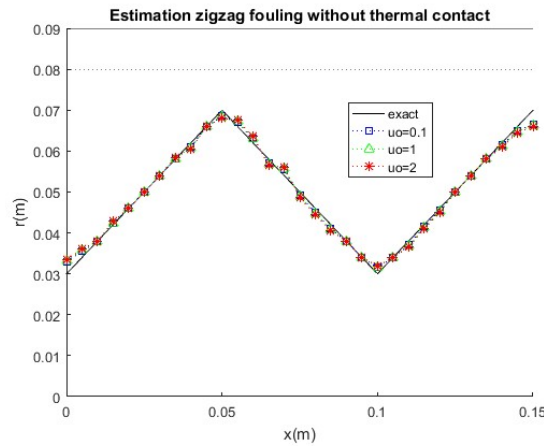
شکل ۸- تخمین رسوب برای  $u_o = 0.1$



شکل ۹- تخمین رسوب برای  $u_o = 1$



شکل ۱۰- تخمین رسوب برای  $u_o = 2$

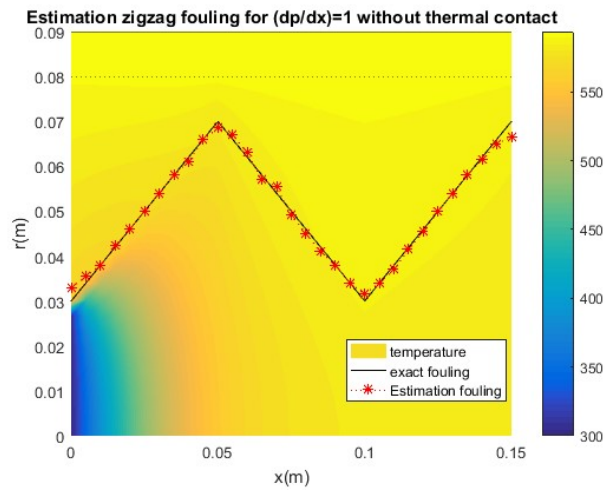


شکل ۱۱- مقایسه تخمین رسوب، برای  $u_0$  های مختلف

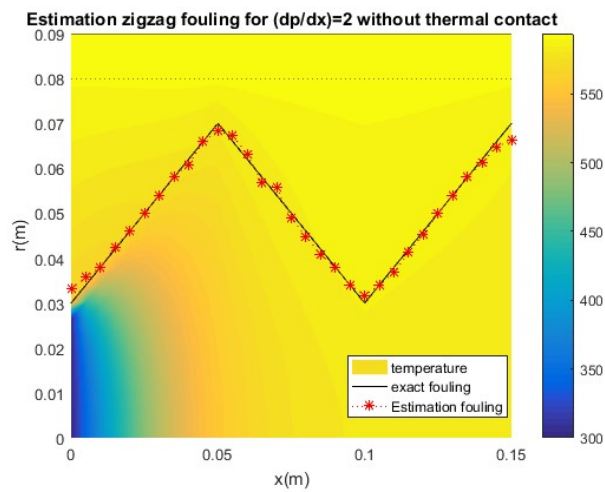
شکل (۱۱) به مقایسه رسوب تخمین زده در سرعت‌های ورودی مختلف می‌پردازد. همانطور که مشاهده می‌شود، دقت روش  $CGM$  در تخمین تابع پروفیل رسوب برای  $u_0$  های مختلف بسیار مناسب است و با افزایش مقدار  $u_0$  تنها مقدار بسیار کمی تغییر در تابع پروفیل رسوب تخمین زده شده ایجاد می‌شود. جدول (۲) میزان دقت روش  $CGM$  در تخمین تابع پروفیل رسوب برای  $u_0$  های مختلف را بیان می‌کند. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت اولیه میزان اختلاف تابع پروفیل رسوب تخمین زده شده با تابع پروفیل رسوب واقعی کمی افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت دقت روش  $CGM$  در تخمین تابع پروفیل رسوب کمی کاهش می‌یابد. با این وجود باز هم روش  $CGM$  در تخمین تابع رسوب بسیار دقیق عمل می‌کند. به منظور بررسی افزایش میزان افت فشار درون لوله های دیگ بخار بر دقت تخمین تابع پروفیل رسوب با استفاده از روش  $CGM$  فرض بر این است که  $\sigma = 0.0$  و سرعت اولیه سیال به درون لوله های دیگ بخار دارای مقدار ثابت ( $u_0 = 0.1$ ) است، سپس برای افت فشارهای مختلف  $\left(\frac{dp}{dx}\right) = 1$  و  $\left(\frac{dp}{dx}\right) = 2$  و  $\left(\frac{dp}{dx}\right) = 3$  میزان تابع پروفیل رسوب تخمین زده می‌شود. شکل (۱۲) و شکل (۱۳) و شکل (۱۴) بترتیب پروفیل رسوب تخمین زده شده برای افت فشار ۱، ۲ و ۳ را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل‌ها مشاهده می‌شود، داده‌های بدست آمده برای تخمین تابع پروفیل رسوب بسیار نزدیک به مقادیر واقعی تابع پروفیل رسوب می‌باشد، بنابراین می‌توان گفت روش گرادیان مزدوج با مسئله الحاقی برای تخمین تابع (روش  $CGM$ ) بسیار دقیق عمل می‌کند. البته در نقاط ابتدایی و انتهایی لوله نوسانات تابع پروفیل رسوب نسبت به سایر نقاط کمی بیشتر است.

جدول ۲- دقت روش  $CGM$  در تخمین تابع پروفیل رسوب برای  $u_0$  های مختلف

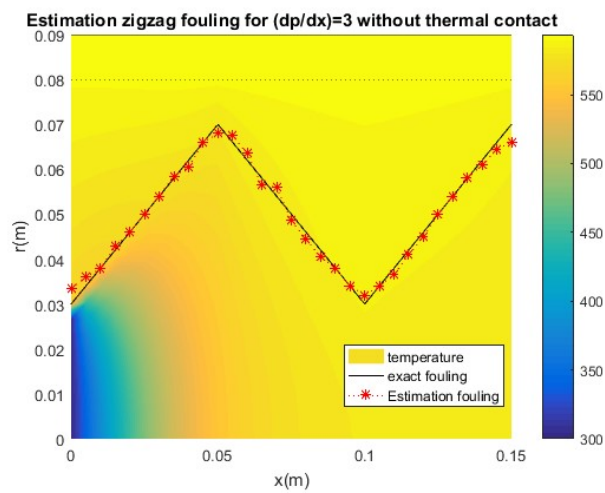
سرعت اولیه	تعداد تکرار	خطای جذر میانگین مربعات
۰,۱	۴۵۳۴	۰,۰۰۰۷۴
۱	۴۳۷۱	۰,۰۰۰۸۷
۲	۴۱۲۶	۰,۰۰۱۱



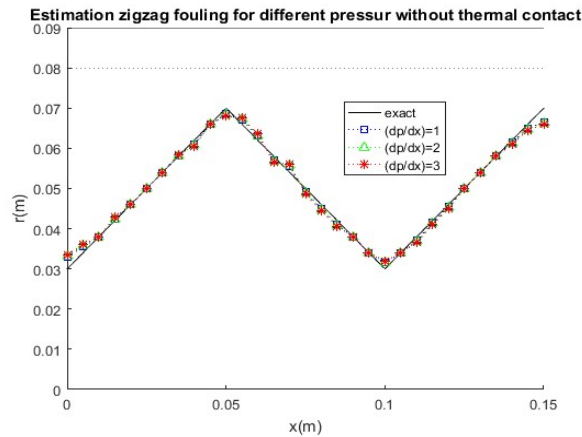
شکل ۱۲- تخمین رسوب برای  $\left(\frac{dp}{dx}\right) = 1$



شکل ۱۳- تخمین رسوب برای  $\left(\frac{dp}{dx}\right) = 2$



شکل ۱۴- تخمین رسوب برای  $\left(\frac{dp}{dx}\right) = 3$



شکل ۱۵- مقایسه تخمین رسوب برای  $(dp/dx)$  های مختلف

جدول ۳- دقت روش  $CGM$  در تخمین پروفیل رسوب برای افت فشار های مختلف

افت فشار	تعداد تکرار	خطای جذر میانگین مربعات
۱	۴۵۳۴	۰,۰۰۰۷۸
۲	۴۴۵۷	۰,۰۰۰۹۳
۳	۴۴۲۹	۰,۰۰۰۹۸

شکل (۱۵) به مقایسه پروفیل رسوب تخمین زده شده در افت فشارهای مختلف پرداخته است. همانطور که مشاهده می‌شود، دقت روش  $CGM$  در تخمین تابع پروفیل رسوب برای افت فشارهای مختلف بسیار مناسب است و با افزایش مقدار افت فشار تنها مقدار کمی تغییر در تابع تابع پروفیل رسوب تخمین زده شده، ایجاد می‌شود. جدول (۳) میزان دقت روش  $CGM$  در تخمین تابع پروفیل رسوب برای افت فشارهای مختلف بیان می‌کند. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش میزان افت فشار درون لوله‌های دیگ بخار میزان اختلاف تابع پروفیل رسوب تخمین زده شده با تابع پروفیل رسوب واقعی کمی افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت دقت روش  $CGM$  در تخمین تابع پروفیل رسوب کمی کاهش می‌یابد. با این وجود باز هم روش  $CGM$  در تخمین تابع رسوب بسیار دقیق عمل می‌کند.

#### ۴- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله تابع پروفیل رسوب با استفاده از روش انتقال حرارت معکوس  $CGM$  تخمین زده شده است، که نتایج آن به شرح زیر می‌باشد:

در این پژوهش با در اختیار داشتن دمای چند نقطه از دیواره دیگ بخار، با استفاده از کدنویسی متلب به روش تفاضل محدود توانستیم، با استفاده از روش انتقال حرارت معکوس گرادیان مزدوج با مسئله الحاقی برای تخمین تابع (روش  $CGM$ )، تابع پروفیل رسوب تشکیل شده در دیواره داخلی لوله‌های دیگ بخار را تخمین بزنیم. به منظور بررسی دقت این روش در تخمین تابع رسوب کمی اختلاف در دمای دیواره لوله دیگ بخار

ایجاد کردیم، مشاهده شد با افزایش اختلاف دما، به مقدار کمی تفاوت میان تابع پروفیل رسوب واقعی و تابع رسوب تخمین زده شده ایجاد می‌شود، که این اختلافات در نقاط ابتدایی و انتهایی لوله‌های دیگ بخار به دلیل ریزتر بودن شبکه کمی بیشتر است. علاوه بر این اثر افزایش سرعت اولیه جریان ورودی به داخل لوله های دیگ بخار و همچنین افزایش افت فشار درون لوله‌های دیگ بخار نیز بر دقت روش *CGM* در تخمین تابع پروفیل رسوب مورد بررسی قرار گرفت، مشاهده شد افزایش سرعت ورودی و میزان افت فشار درون لوله های دیگ بخار تاثیر بسیار ناچیزی بر دقت روش *CGM* در تخمین تابع پروفیل رسوب دارد، بنابراین می‌توان گفت: روش انتقال حرارت معکوس گرادیان مزدوج با مسئله الحاقی برای تخمین تابع، دقت بالایی در تخمین تابع پروفیل رسوب دارد.

## مراجع

- [1] Carnogurska, M., Prihoda, M., and Molinek, J., "Determination of Deposit Thickness in Natural Gas Cooler Based on the Measurements of Gas Cooling Degree", *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 25, pp. 2935-2941, (2011).
- [2] Lenic, K., Trp, A., and Frankovic, B., "Transient Two-dimensional Model of Frost Formation on a Fin-and-tube Heat Exchangers", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 22-32, (2009).
- [3] Saghatoleslami, N., Salooki, M.K., and Armin, M.A., "Prediction of Thickness and Fouling Rate in Pulsating Flow Heat Exchangers using FLUENT Simulator", *Korean Journal Chemical Engineering*, Vol. 27, pp. 96-103, (2009).
- [4] Wallhauber, E., Hussein, M.A., and Becker, T., "Detection Methods of Fouling in Heat Exchangers in the Food Industry", *Food Control*, Vol. 27, pp. 1-10, (2012).
- [5] Lalot, S., and Palsson, H., "Detection of Fouling in a Cross-flow Heat Exchanger using a Neural Network Based Technique", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 49, pp. 675-679, (2010).
- [6] Mohanty, D.K., and Singru, P.M., "Use of C-factor for Monitoring of Fouling in a Shell and Tube Heat Exchanger", *Energy*, Vol. 36, pp. 2899-2904, (2011).
- [7] Jonsson, G.R., Lalot, S., Palsson, O.P., and Desmet, B., "Use of Extended Kalman Filtering in Detecting Fouling in Heat Exchangers", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 2643-2655, (2007).
- [8] Delrot, S., Guerra, T.M., Dambrine, M.F., and Delmotte, O., "Fouling Detection in a Heat Exchanger by Observer of Takagi-Sugeno Type for Systems with Unknown Polynomial Inputs", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 25, pp. 258-264, (2012).
- [9] Merheb, B., Nassar, G., Nongailard, B., Delaplace, G., and Leuliet, J.C., "Design and Performance of a Low-frequency Non-intrusive Acoustic Technique for Monitoring Fouling in Plate Heat Exchangers", *Journal of Food Engineering*, Vol. 82, pp. 518-527, (2007).

- [10] Chen, W.L., and Yang, Y.Ch., “Inverse Estimation for Unknown Fouling-layer Profiles with Arbitrary Geometries on the Inner Wall of a Forced-convection Duct”, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 49, pp. 86-98, (2010).
- [11] Delmotte, F., Dambrine, M., Delrot, S., and Lalot, S., “Fouling Detection in a Heat Exchanger: A Polynomial Fuzzy Observer Approach”, Control Engineering Practice, Vol. 21, pp. 1386-1395, (2013).
- [12] Adili, A., Kerkeni, C., and Nasrallah, S.B., “Estimation of Thermophysical Properties of Fouling using Inverse Problem and its Impact on Heat Transfer Efficiency”, Solar Energy, Vol. 83, pp. 1619-1628, (2009).
- [13] Adili, A., Hasni, N., Kerkeni, C., and Nasrallah, S.B., “An Inverse Problem Based on Genetic Algorithm to Estimate Thermophysical Properties of Fouling”, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 49, pp. 889-900, (2010).
- [14] Ozisik, M.N., and Orlande, H.R.B., “Inverse Heat Transfer: Fundamental and Applications”, 2th Edition., Taylor & Francis Publisher, New York, USA, (2000).

### فهرست نمادهای انگلیسی

$CGM$ : روش گرادیان مزدوج با مسئله الحاق

$f(x)$ : پروفیل رسوب تخمین زده شده

$h$ : ضریب انتقال حرارت جابجایی اطراف لوله

$k_f$ : ضریب رسانش ناحیه سیال

$k_{s1}$ : ضریب رسانش ناحیه رسوب

$k_{s2}$ : ضریب رسانش ناحیه دیواره لوله

$M$ : تعداد سنسورها

$p$ : سمت نزول

$\beta$ : اندازه گام جستجو

$\alpha$ : ضریب پخش ناحیه سیال

$\rho$ : چگالی

$\sigma$ : انحراف معیار

$\gamma$ : ضریب مزدوج

$J$ : ژاکوبین

$\delta$ : تابع دلتا دیراک

$\lambda_f$ : ضریب لاگرانژ در ناحیه سیال

$\lambda_{s1}$ : ضریب لاگرانژ در ناحیه رسوب

$\lambda_{s2}$ : ضریب لاگرانژ در ناحیه دیواره لوله

$\left(\frac{dp}{dx}\right)$ : افت فشار داخل لوله‌های دیگ بخار

$u_o$ : سرعت سیال ورودی به لوله‌های دیگ بخار

**Abstract**

One of the effective factors in decreasing the efficiency of boilers during the operation period is sediment. The sediment sits as a layer on the boiler's heat transfer surfaces and reduces the boiler's thermal efficiency due to the thermal resistance it creates. For this reason, it is very important to determine the amount of sediment and to accurately measure it in boiler pipes.

In this paper, it is assumed that no information is available on the distribution of sediment in boiler pipes, so the sediment profile is estimated using temperature simulation on the inner wall of boiler pipes as well as conjugate gradient method. In this method, the error rate was calculated by estimating the function of multi-criteria sediment profile  $error = 0.00074$ , which indicates the high accuracy of the conjugate gradient method in sediment estimation. The amount of sediment exceeded a specified value.