



## شناسایی و تخمین دقیق پارامترهای هندسی عیوب واقع بر سطوح داخلی لوله‌ها با استفاده از روش رسانش حرارتی معکوس

مجتبی درودی<sup>1</sup>، فرشاد کوشری<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

\* تهران، صندوق پستی 1439957131، fkowsari@ut.ac.ir

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 21 دی 1396

پذیرش: 21 بهمن 1396

ارائه در سایت: 19 فروردین 1397

کلید واژگان:

شناسایی عیوب

سیستم لوله

معادله رسانش حرارتی

مسأله معکوس

### چکیده

شناسایی عیوب واقع بر سطوح داخلی لوله‌ها به علت ویژگی ذاتی این سطوح که غیرقابل دسترس می‌باشند، همواره فرآیندی دشوار بوده است. در این پژوهش به طراحی روشی نوین در شناسایی محل عیوب واقع بر سطوح داخلی لوله‌ها و تخمین دقیق پارامترهای هندسی آن از قبیل طول عیب و متوسط عمق کاسته شده از دیواره لوله پرداخته شده است. روش کار بدین صورت است که در محل بازرسی یک گرم‌کن نواری بر سطح بیرونی لوله قرار گرفته و برای مدت کوتاهی شار حرارتی مشخصی به آن سطح اعمال می‌گردد و دمای حسگرهای واقع در زیر گرم‌کن در زمان اعمال شار حرارتی و اندکی پس از آن اندازه‌گیری می‌شود. افزایش موضعی درجه حرارت در قسمتی از سطح بیرونی لوله نشان از وجود عیب بر سطح داخلی آن است؛ در این صورت با فرض یک عیب با پارامترهای نامشخص بر سطح داخلی لوله و بهره‌گیری از روش رسانش حرارتی معکوس، فرآیند شبیه‌سازی عددی در یک الگوریتم تکرارپذیر تا جایی ادامه می‌یابد که پارامترهای هندسی نامشخص عیب موجود به نحوی تخمین زده شود که اختلاف دمای اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده در محل حسگرها حداقل شود.

## Detection and Accurate Estimation of Geometrical Parameters of Defects on the Internal Surfaces of Pipes Using Inverse Heat Conduction Method

Mojtaba Darroudi, Farshad Kowsari\*

Faculty of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

\* P.O.B. 1439957131 Tehran, Iran, fkowsari@ut.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 11 January 2018  
Accepted 10 February 2018  
Available Online 08 April 2018

**Keywords:**  
Defect Detection  
Pipe System  
Heat Conduction Equation  
Inverse Problem

### ABSTRACT

Detection of defects in the internal surfaces of pipes due to the inherent feature of these surfaces which is inaccessibility is always a troublesome process. In this study, a novel method has been designed for detection of defect locations on the internal surfaces of pipes and accurate estimation of defect geometrical parameters such as length and average material loss depth. The way that this method works is that a band heater is located on the external surface of the pipe in inspection segment, and specified heat flux is applied to this surface for a short time, and the temperature of these sensors located on rear of the band heater is measured during and after of applying thermal heat flux. The local temperature rise on the section of the external surface of the pipe indicates a defect on its internal surface. In this case, a defect with unknown parameters is supposed on the internal surface of the pipe, and by using the inverse heat conduction method, an iterative numerical simulation procedure continues until the unknown geometrical parameters of defects are estimated in a way to minimize the difference between the measured and simulated temperature in the location of sensors.

### 1- مقدمه

ایمنی سیستم، یک برنامه زمانی دقیق برای پیش‌بینی طول عمر تجهیزات و زمان خارج نمودن سیستم از خط به‌منظور تعمیر یا تعویض برخی از قسمت‌های سیستم تنظیم کرد [2]. همچنین در مواردی که عیوب موجود بر سطوح داخلی لوله ناشی از تماس دیواره با سیال خورنده باشد و در صورتی که پس از شناسایی این عیوب تشخیص داده شود که افزایش نرخ خوردگی به اختلال زود هنگام سیستم منجر می‌گردد، می‌توان نرخ خوردگی را با روش‌های گوناگونی مانند تزریق مواد شیمیایی بازدارنده خوردگی در داخل جریان سیال تا حد قابل قبولی کاهش داد [3].

تاکنون روش‌های بسیار متنوعی جهت شناسایی عیوب در خطوط لوله طراحی و مورد استفاده قرار گرفته است. این روش‌ها معمولاً به دو دسته کلی

یکی از معمول‌ترین عیوب واقع بر سطوح داخلی لوله‌ها، عیب ناشی از خوردگی و سایش به‌ویژه در لوله‌های فلزی است. تاکنون روش‌های متعددی جهت محافظت لوله‌های فلزی در برابر شکل‌گیری این عیوب پیشنهاد شده است. یکی از متداول‌ترین این روش‌ها ایجاد یک لایه محافظ مناسب مانند پلی اورتان بر سطوح لوله است [1]. با وجود به‌کارگیری روش‌های متعدد جهت کاهش نرخ شکل‌گیری این عیوب همچنان پدیده‌هایی مانند خوردگی و سایش از جمله عیوب غیرقابل اجتناب در خطوط لوله به شمار می‌روند. روش‌های متعددی جهت شناسایی عیوب داخلی در خطوط لوله پیشنهاد شده است؛ زیرا شناسایی عیوب این امکان را فراهم می‌آورد که ضمن حفظ

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:  
M. Darroudi, F. Kowsari, Detection and Accurate Estimation of Geometrical Parameters of Defects on the Internal Surfaces of Pipes Using Inverse Heat Conduction Method, *Modares Mechanical Engineering* Vol. 18, No. 04, pp. 211-222, 2018 (in Persian)

تخمین ضخامت دیواره بویلر<sup>۱۲</sup>، مقدار عمق حفره ایجاد شده روی دیواره داخلی کوره و تشخیص شکل نامشخص دیواره داخلی یک جسم جامد اشاره کرد [10، 11]. از مرتبط‌ترین مطالعات صورت گرفته با موضوع پیش رو به اختصار می‌توان به پژوهش‌های زیر اشاره کرد.

در سال 1997 اینگلس [12] یک مسئله تئوری با هدف تعیین مشخصه کمی خوردگی واقع بر سطح غیرقابل دسترس یک نمونه تعریف کرده و مقدار ولتاژ بر سطح قابل دسترس را به عنوان اطلاعات ورودی یک مسئله معکوس در نظر گرفته است. با مدل سازی فیزیک حاکم بر مسئله با معادله لاپلاس و در نظر گرفتن یک ضریب مجهول برای شرط مرزی صفحه غیرقابل دسترس که برای توصیف مشخصه خوردگی به کار می‌رود؛ ضریب مجهول با فرض نازک بودن صفحه نمونه تعیین شده است.

در سال 2005 یانگ و همکاران [13] مسئله تعریف شده توسط اینگلس را با جزئیات یکسان اما این بار برای یک مدل لوله دوبعدی پیاده سازی کرده و از روش المان مرزی مرتب سازی شده<sup>۱۳</sup> برای حل مسئله معکوس و به دست آوردن ضریب مجهول در شرط مرزی دیواره داخلی استفاده کردند.

در سال 2010 سیاوشی و همکاران [14] برای تشخیص مشخصه‌های نقص موجود در یک جسم جامد دوبعدی در شرایط پایا<sup>۱۴</sup> از طریق اعمال شار حرارتی معلوم در مرزهای این جسم و اندازه گیری دما در مکان‌هایی از پیش تعیین شده و با تعریف یک مسئله انتقال حرارت معکوس، شکل نقص موجود را برای چندین نمونه متفاوت تخمین زده‌اند.

در سال 2013 ماکرجی و همکاران [15] با تعریف یک مسئله معکوس و با استفاده از روش نشتی شار مغناطیسی<sup>۱۵</sup> به تخمین طول و عرض عیب واقع بر سطح یک ورق پرداخته‌اند.

در پژوهش حاضر روشی نوین جهت شناسایی موضعی محل وقوع عیوب داخلی لوله‌ها و همچنین تخمین دقیق مشخصه‌های هندسی عیب موجود از قبیل طول و عمق کاسته شده از دیواره لوله معرفی شده است. با کمک این روش می‌توان در محیط آزمایشگاهی از ابزاری ساده و ارزان قیمت جهت اندازه گیری در زمانی بسیار کوتاه استفاده کرد و پس از آن با در دست داشتن داده‌های اندازه گیری شده و به کمک رایانه یک مدل ریاضی که بر پایه اصول رسانش حرارتی معکوس استوار است، پیاده سازی کرد و محل عیب و پارامترهای هندسی آن را به کمک شبیه سازی عددی در یک الگوریتم تکرارپذیر با دقت بالایی تخمین زد. روش معرفی شده این امکان را دارد که جهت شناسایی محل و تخمین دقیق پارامترهای هندسی عیوب داخلی برای هر دو حالت اینلاین<sup>۱۶</sup> و آفلاین<sup>۱۷</sup> یک سیستم لوله استفاده گردد. سیستم اینلاین به حالتی اطلاق می‌شود که خط لوله در حال انتقال سیال باشد و حالت آفلاین مربوط به زمانی است که سیستم به دلایلی از جمله بازرسی عیوب و یا تمیزکاری از خط خارج می‌شود [16]. مدل سازی در این پژوهش به منظور سهولت در ارزیابی صحت روش معرفی شده برای حالت آفلاین انجام شده است. در ادامه دلایل این انتخاب و راهکار لازم برای پیاده سازی این روش در حالت اینلاین بیان شده است.

روش‌های مخرب<sup>۱</sup> و غیر مخرب<sup>۲</sup> تقسیم بندی می‌شوند. روش‌های مخرب نیازمند ایجاد مداخله در کار سیستم با استفاده از ابزارهایی مانند پی اچ سنج<sup>۳</sup>، حسگرهای الکتروشیمیایی<sup>۴</sup> و از این قبیل خواهد بود، اما روش‌های غیر مخرب هیچ گونه اختلالی در عملکرد سیستم ایجاد نمی‌کنند؛ از این رو امروزه استفاده از روش‌های غیر مخرب در تشخیص عیوب داخلی خطوط لوله بسیار رایج است که این امر موجب می‌شود که تلاش‌های بسیاری در جهت طراحی روش شناسایی جامع تر و دقیق تر نسبت به روش‌های پیشین انجام شود. از مرسوم ترین روش‌های غیر مخرب در این زمینه می‌توان به بازرسی بصری<sup>۵</sup>، آزمون جریان گردابی<sup>۶</sup>، نشر فرا آوایی<sup>۷</sup>، امواج هدایت شده فراصوت<sup>۸</sup>، پرتونگاری<sup>۹</sup> و تصویربرداری حرارتی<sup>۱۰</sup> اشاره کرد [4-6].

هر کدام از روش‌های غیر مخرب متداولی که تاکنون در شناسایی عیوب سطوح داخلی لوله‌ها طراحی و ساخته شده است در کاربردهای مختص خود مانند شناسایی خوردگی، سایش، ترک، حفره و ... می‌تواند نسبت به سایر روش‌ها برتری داشته باشد. در واقع هیچ روش واحدی نمی‌تواند جهت شناسایی تمامی انواع عیوب لوله‌ها مورد استفاده قرار گیرد [4]. دو نکته قابل توجه در خصوص اکثر این روش‌ها صادق است. نخست آن که، پیاده سازی برخی از این روش‌ها جهت شناسایی عیوب مستلزم فراهم نمودن تجهیزات آزمایشگاهی گران قیمت است. دوم آن که، در دسته‌ای از این روش‌ها صرفاً به شناسایی محل عیوب پرداخته می‌شود و در خصوص مشخصه‌های عیب واقع بر سطوح غیرقابل دسترس از قبیل طول عیب یا مقدار ضخامت کاسته شده از دیواره لوله اطلاعات جامعی به دست نمی‌آید. در این پژوهش ضمن طراحی روشی ساده و استفاده از تجهیزاتی ارزان قیمت، به شناسایی محل عیب واقع بر سطوح داخلی لوله‌ها و تخمین پارامترهای هندسی آن با ایجاد تحریک حرارتی بر سطح بیرونی لوله و حل مسئله انتقال حرارت معکوس پرداخته می‌شود.

روش معکوس امروزه برای حل گستره وسیعی از مسائل مهندسی به کار می‌رود، به گونه‌ای که کاربردهایی از آن را می‌توان در اکثر زمینه‌های تخصصی به وضوح مشاهده کرد [7]. مسائل معکوس علی‌رغم اینکه ماهیتی بد وضع<sup>۱۱</sup> دارند، اما حل‌هایی که از آن به دست می‌آید برای مسائل تئوری و یا طراحی تکنیک‌های اندازه گیری بسیار حائز اهمیت است؛ به ویژه در شرایطی که اندازه گیری مستقیم یک پارامتر دشوار یا ابزار اندازه گیری گران قیمت بوده و یا مهم تر از همه اندازه گیری مستقیم پارامتر مربوطه با توجه به پیچیدگی فیزیک مسئله یا شرایط حاکم بر آن امکان پذیر نباشد. تحت چنین شرایطی با استفاده از ابزاری ساده جهت اندازه گیری کمیتی وابسته به پارامترهای مجهول مسئله و انجام شبیه سازی عددی می‌توان پارامتر مورد نظر را با حل مسئله معکوس با دقت مطلوبی تخمین زد [8، 9].

یکی از موضوعات مطرح در مسائل معکوس که توجه بسیار زیادی را در سالیان اخیر به خود معطوف کرده است، به کارگیری روش معکوس در تشخیص مشخصه‌های هندسی یک مسئله است. از کاربردهای آن می‌توان به

<sup>1</sup> Destructive/Intrusive

<sup>2</sup> Non-Destructive/ Non-Intrusive

<sup>3</sup> pH-Meter

<sup>4</sup> Electrochemical Sensors

<sup>5</sup> Visual Inspection

<sup>6</sup> Eddy Current

<sup>7</sup> Acoustic Emission

<sup>8</sup> Ultrasonic Guided Wave

<sup>9</sup> Radiography

<sup>10</sup> Thermal Imaging

<sup>11</sup> Ill-Posed

<sup>12</sup> Boiler

<sup>13</sup> Regularized Boundary Element Method: (BEM)

<sup>14</sup> Steady-State

<sup>15</sup> magnetic flux leakage: (MFL)

<sup>16</sup> Inline

<sup>17</sup> Offline

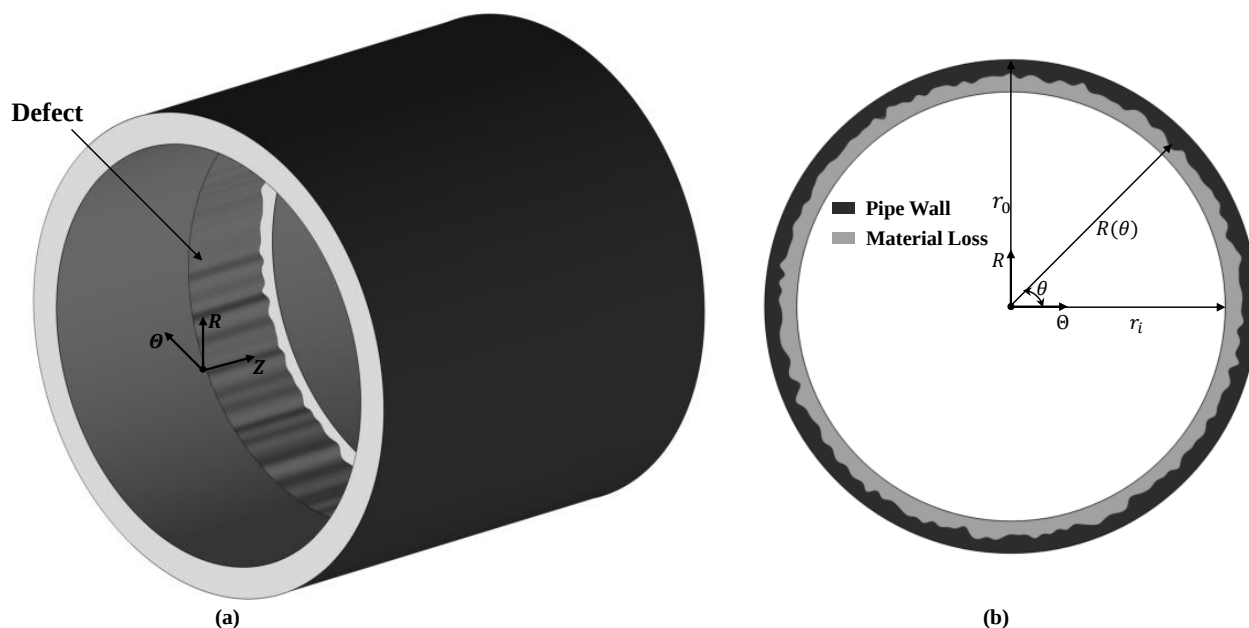


Fig. 1 a-A view of a pipe with internal defect, b-Cross section of the pipe with internal defect

شکل 1 الف- نمایی از یک لوله دارای عیب داخلی، ب- مقطع عرضی لوله دارای عیب داخلی

این گرم‌کن‌ها اعمال حرارت موضعی و گذرا به سطوح لوله‌هاست؛ بدین‌صورت که می‌توان یک گرم‌کن مناسب روی سطح بیرونی لوله قرار داده و در زمان دلخواه با روشن کردن آن حرارتی معلوم به سطح لوله اعمال کرد. اکثریت این گرم‌کن‌ها به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که دارای پاسخ سریع و عملکرد بالا بوده و اثر تأخیر حرارتی<sup>۲</sup> در آن‌ها وجود ندارد؛ از این‌رو شار حرارتی با روشن کردن گرم‌کن بلافاصله از طریق آن به سطح بیرونی لوله اعمال می‌شود. با انجام این تحریک حرارتی، تغییرات دما روی سطح بیرونی که تحت اعمال شار حرارتی قرار گرفته است محسوس خواهد بود و می‌توان تغییرات زمانی دمای سطح بیرونی لوله را با تعبیه تعدادی حسگر<sup>۳</sup> دما در زیر گرم‌کن اندازه‌گیری کرد.



Fig. 2 A view of a band heater

شکل 2 نمایی از یک گرم‌کن نواری

## 2- طراحی آزمایش

در این بخش تجهیزات موردنیاز و نحوه آماده‌سازی آن‌ها جهت اندازه‌گیری کمیت حساس به مشخصه‌های هندسی عیب واقع بر سطوح داخلی لوله بیان شده است.

در شکل 1-a بخشی از یک سیستم لوله نشان داده شده است که عیبی روی سطح داخلی آن وجود دارد. این عیب می‌تواند بر اثر عوامل متعددی ایجاد شده باشد. عیب موجود در مکانی نامشخص واقع شده و طول و عمق کاسته شده از دیواره لوله نیز نامعلوم است. همچنین عیب موجود دارای توزیع محیطی غیریکنواخت است (شکل 1-b). از آنجایی که امکان دسترسی و مشاهده سطح داخلی لوله وجود ندارد؛ بنابراین طراحی آزمایش باید به‌گونه‌ای انجام شود که ابتدا کمیت حساس به مشخصه‌های هندسی عیب را تعیین کرده و سپس با اندازه‌گیری آن کمیت، وجود یا عدم وجود عیب روی سطح داخلی لوله را بررسی کرد. در صورت وجود عیب باید با بهره‌گیری از شبیه‌سازی عددی و روش مناسب، مکان دقیق و پارامترهای هندسی آن از قبیل طول عیب و عمق کاسته شده از دیواره لوله تخمین زده شود. این احتمال می‌رود که نحوه توزیع دما روی سطح بیرونی لوله در صورت وجود نقص روی سطح داخلی آن در مقایسه با لوله بدون عیب متفاوت باشد؛ در این صورت اگر با تغییر پارامترهای هندسی عیب موجود نحوه توزیع دما روی سطح بیرونی لوله نیز دستخوش تغییر شود؛ آن‌گاه می‌توان نتیجه گرفت که تابع دمای سطح بیرونی لوله دارای حساسیت نسبت به پارامترهای هندسی عیب واقع بر سطح داخلی لوله است؛ بنابراین برای بررسی این احتمال به تحریک حرارتی سطح بیرونی لوله نیاز است. برای ایجاد این تحریک حرارتی می‌توان از یک گرم‌کن نواری<sup>۱</sup> استفاده کرد.

گرم‌کن‌های نواری ابزاری ساده و ارزان‌قیمت هستند که برای ایجاد حرارت بیرونی با تراکم وات بالا به کار می‌روند (شکل 2). یکی از کاربردهای

<sup>2</sup> Thermal Lag

<sup>3</sup> Sensor

<sup>1</sup> Band Heater

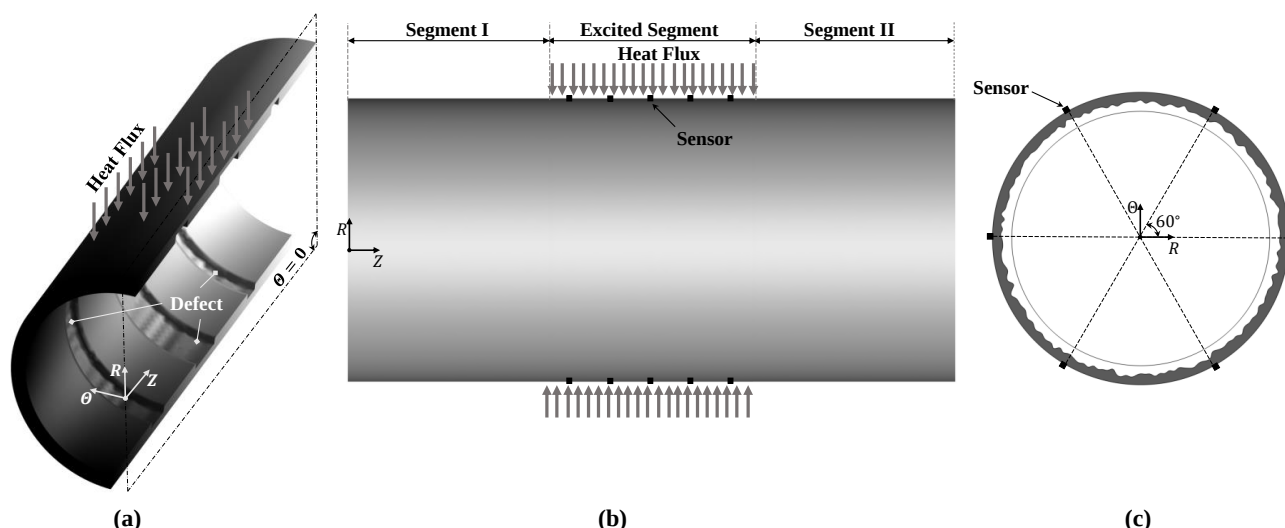


Fig. 3 a- Cut of view of the specimen, b- Longitudinal cross section of the specimen, c- Cross section of the specimen

شکل 3 الف- نمای برش خورده نمونه موردبررسی، ب- نمای جانبی نمونه موردبررسی، ج- مقطع عرضی نمونه موردبررسی

با در نظر گرفتن حالت آفلاین سیستم و عدم نیاز به حل معادلات جریان، معادله رسانش حرارتی در مختصات استوانه‌ای به صورت معادله (1) و شرایط مرزی به صورت روابط (2-5) است.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left( R \frac{\partial T}{\partial R} \right) + \frac{1}{R^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right) \quad r(\theta) \leq R \leq r_o, 0 \leq z \leq L \quad (1)$$

$$\frac{\partial T}{\partial Z} = 0 \quad z = 0, z = L \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial R} = 0 \quad R = r(\theta) \quad (3)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial R} = h(T_s - T_{\infty}) \quad R = r_o, Z \in [0, L] - [W_s, W_s + W] \quad (4)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial R} = -q \quad R = r_o, W_s \leq Z \leq W_s + W \quad (5)$$

در روابط (5,4)  $W_s$  و  $W$  به ترتیب عرض گرم‌کن و فاصله قرارگیری گرم‌کن از ابتدای لوله و همچنین  $q$  در معادله (5) شار حرارتی اعمال‌شده توسط گرم‌کن است که با توجه به زمان خاموش و روشن بودن آن به صورت رابطه (6) تعریف می‌شود.

$$q = \begin{cases} Q_{\text{Heater}}, & 0 \leq t \leq t_c \\ 0, & t_c < t \leq t_f \end{cases} \quad (6)$$

$t_c$  زمان روشن بودن گرم‌کن و  $t_f$  کل زمان داده‌برداری است. شرط اولیه نیز با توجه به شرایط تعادل حرارتی با دمای محیط در شروع آزمایش به صورت رابطه (7) است.

$$T(R, \theta, Z, 0) = T_{\infty} \quad (7)$$

حال اگر عیبی روی سطح داخلی لوله وجود داشته باشد که موجب تغییر در ضخامت دیواره گردد، در مکان‌هایی که بخشی از دیواره لوله معیوب شده است افزایش دما مشاهده خواهد شد. این تغییر ناگهانی دمای سطح بیرونی لوله دلیل بر عدم یکپارچگی دیواره داخلی است. برای بررسی صحت این موضوع با حل معادلات رسانش حرارتی در جداره لوله و درحالی‌که چندین

برای بررسی میزان حساسیت دمای سطح بیرونی لوله نسبت به مشخصه‌های هندسی عیب واقع بر سطح داخلی، بخشی از یک سیستم لوله که عیوبی مشخص روی سطوح داخلی آن وجود دارد به‌عنوان نمونه در نظر گرفته شده است. در شکل 3-a-3 نمای برش خورده از نمونه موردبررسی که روی سطح داخلی آن در مکان‌های مختلف چندین عیب متفاوت وجود دارد، نشان داده شده است. این عیوب از لحاظ طول و عمق کاسته شده از دیواره لوله با یکدیگر تمایز داشته و دارای توزیع محیطی غیریکنواخت هستند.

پیش از انجام آزمایش سطح بیرونی لوله برای مدت طولانی در تماس با هوای محیط بوده و نمونه موردبررسی در تعادل حرارتی با محیط اطراف قرار دارد. در شکل 3-b-3 نمای جانبی نمونه را نشان می‌دهد، تنها بخشی از لوله که عرض آن برابر با عرض گرم‌کن است با شار حرارتی تحریک می‌شود و ناحیه‌های 1 و 2 که به ترتیب قبل و بعد از ناحیه تحریک واقع شده‌اند، همچنان در معرض هوای محیط قرار دارند. با قرار دادن گرم‌کن در ناحیه موردبررسی، سطح بیرونی لوله در آن قسمت از لحاظ حرارتی تحریک خواهد شد و از لحظه روشن کردن گرم‌کن تا زمان خاموش نمودن و اندکی پس‌از آن تغییرات دما با زمان در محل حسگرها اندازه‌گیری می‌شود. مجموعه حسگرهایی برای اندازه‌گیری تغییرات دما با زمان با فواصل یکسان در زیر گرم‌کن و در راستای محور لوله مطابق شکل 3-b به‌گونه‌ای قرار گرفته‌اند که روی محیط لوله نیز دارای فواصل یکسان باشند (شکل 3-c).

در یک لوله سالم و بدون عیب باید تمامی حسگرها در یک مقطع عرضی معین در راستای طول لوله، دمای یکسانی را در هر گام زمانی<sup>1</sup> نشان دهند، زیرا میزان شار حرارتی توزیع مکانی نداشته و در سرتاسر گرم‌کن شار یکنواختی به سطح بیرونی لوله اعمال می‌شود. البته در جهت طولی به علت تأثیرپذیری از اثرات لبه و تغییر شرط مرزی از حالت شار ثابت به شرط مرزی جابجایی تغییرات کمی وجود خواهد داشت؛ از این‌رو جهت کاهش تأثیرپذیری حسگرها از اثرات لبه، اولین و آخرین حسگر در راستای طولی با فاصله کمی از لبه‌های گرم‌کن قرار می‌گیرند.

<sup>1</sup> Time Step

## 3- حل مسئله مستقیم

حل مستقیم در مسائل انتقال حرارت به حالتی اطلاق می‌شود که با مشخص بودن پارامترهای هندسی و شرایط مرزی و با حل معادله انتقال حرارت، توزیع دما در جسم محاسبه شود. حل مستقیم در الگوریتم معکوس مکرراً فراخوانی می‌شود؛ از این رو نحوه مدل‌سازی و شبیه‌سازی عددی مسئله مستقیم بسیار حائز اهمیت است [18].

## 3-1- فرضیات و ساده‌سازی

با توجه به ماهیت مسئله معکوس که مبتنی بر تکرار است، شبیه‌سازی عددی نیز بارها انجام خواهد شد؛ از این رو در مسئله پیش رو هرچه فرضیات منطقی و ساده‌سازی‌های ممکن به‌گونه‌ای در نظر گرفته شود که در تخمین مقدار دقیق پارامترها خطای ناچیزی ایجاد کند می‌تواند موجب تسریع در فرآیند شناسایی و تخمین پارامترها گردد که در مقایسه با پذیرش مقدار ناچیزی خطا کارایی بهتری دارد.

با توجه به شکل 4 می‌توان دریافت که تنها بخشی از لوله که به صورت حرارتی تحریک شده تحت تأثیر شار اعمالی قرار گرفته است و ناحیه‌های قبل و بعد از ناحیه تحریک بسیار کم تحت تأثیر این شار قرار گرفته‌اند، زیرا شار اعمالی به سطح بیرونی آن‌ها اعمال نشده و زمان نسبتاً کم اعمال شار حرارتی در ناحیه تحریک مانع از گسترش حرارت در زمان داده‌برداری خواهد شد. از سوی دیگر شرط مرزی حرارتی جابجایی در این ناحیه‌ها به دلیل ضریب انتقال حرارت کم جریان هوای محیط و تبادل حرارت طولانی‌مدت سطح لوله با جریان هوا پیش از انجام آزمایش موجب خواهد شد که تأثیر حرارتی آن بر سطح لوله به‌شدت ضعیف‌تر از اعمال شار تحریک باشد؛ از این رو در زمان داده‌برداری هنوز بخش اعظمی از ناحیه‌های قبل و بعد از ناحیه تحریک تحت تأثیر شار اعمالی قرار نگرفته‌اند و مانند یک جسم نیمه‌بینهایت رفتار می‌کنند. از سوی دیگر تنها از دماهای اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای واقع در زیر گرم‌کن به‌عنوان ورودی مسئله معکوس جهت تخمین پارامترهای هندسی عیب موجود در همان ناحیه موردبررسی استفاده می‌شود که با توجه به نفوذ کم حرارت به سایر نواحی اثرپذیری حسگرهای واقع در ناحیه تحریک از سایر عیوب احتمالی موجود در سایر نواحی بسیار ناچیز است. با توجه به این دو نکته می‌توان تنها بخش کمی از لوله را در قبل و بعد از ناحیه تحریک مدل‌سازی کرد. با شبیه‌سازی‌های انجام‌شده مشخص شد که در بازه کوتاه داده‌برداری حدود 10% عرض گرم‌کن در قبل و بعد از ناحیه تحریک به صورت جزئی تحت تأثیر شار اعمالی قرار می‌گیرد و در فواصل دورتر تغییر دمای مقطع عرضی دیواره لوله کمتر از 0.01% است که با فرض جسم نیمه‌بینهایت برای شرط مرزی دوردست تطابق کامل دارد؛ این امر سبب می‌گردد که زمان شبیه‌سازی عددی کاهش یافته و طراحی این آزمایش جهت شناسایی و تخمین پارامترهای عیب موجود در ناحیه در دست بازرسی مستقل از عیوب احتمالی موجود در سایر ناحیه‌های قبل و بعد از ناحیه تحریک باشد. برای بررسی صحت این فرض، مسئله پیش دوباره شبیه‌سازی شده است، اما با این تفاوت که علاوه بر ناحیه تحریک، تنها بخش کمی از ناحیه‌های قبل و بعد از آن مدل شده‌اند که سطوح بیرونی این نواحی در تماس با هوای محیط قرار داشته و شار حرارتی به آن‌ها اعمال نشده است. تغییر دمای سطح بیرونی لوله برای این حالت در شکل 5 نشان داده شده است.

عیب متفاوت روی سطح داخلی وجود دارد، می‌توان حساسیت دمای سطح بیرونی لوله را نسبت به پارامترهای هندسی عیوب داخلی بررسی کرد. معادلات (1-7) برای نمونه نشان داده‌شده در شکل 3 و با در نظر گرفتن مقادیر جدول 1 برای خواص ماده، مشخصه‌های هندسی و مشخصه‌های حرارتی آن به صورت عددی و با بهره‌گیری از روش حجم محدود<sup>1</sup> حل شده و توزیع دمای سطح بیرونی لوله در شکل 4 نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود دمای سطح بیرونی لوله در محل عیب داخلی نسبت به سایر بخش‌های لوله افزایش داشته است؛ بنابراین این تغییر دمای سطح بیرونی لوله در محل وقوع نقص نشان از حساسیت دما نسبت به پارامترهای هندسی عیب واقع بر سطح داخلی لوله دارد. نکته مهم دیگر در انجام این آزمایش این است که زمان اعمال حرارت به سطح بیرونی لوله اندک بوده و پس از قطع شار اعمالی به سطح بیرونی لوله برای مدت کوتاهی همچنان اطلاعات مربوط به تغییرات دما با زمان گزارش می‌شود؛ دلیل این امر جلوگیری از افزایش بیش‌ازحد دمای سطح لوله است تا از تغییر شکل احتمالی و ایجاد تنش حرارتی پیش‌گیری شود [17].

جدول 1 خواص ماده، مشخصه‌های هندسی و مشخصه‌های حرارتی نمونه

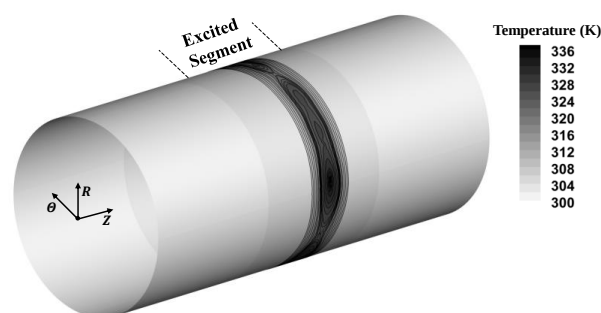
Table 1 Material properties, geometrical parameters, and thermal parameters of specimen

| پارامتر                                      | نماد                | مقدار    | واحد                              |
|----------------------------------------------|---------------------|----------|-----------------------------------|
| قطر داخلی لوله <sup>(*)</sup>                | $D_i$               | 146.328  | mm                                |
| قطر بیرونی لوله                              | $D_o$               | 168.274  | mm                                |
| عرض گرم‌کن <sup>(**)</sup>                   | $W$                 | 381      | mm                                |
| طول لوله                                     | $L$                 | 271      | mm                                |
| چگالی                                        | $\rho$              | 8027.122 | kgm <sup>-3</sup>                 |
| ضریب رسانش حرارتی                            | $k$                 | 16.269   | Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>  |
| ضریب گرمای ویژه                              | $C_p$               | 502.416  | Jkg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> |
| ظرفیت حرارتی گرم‌کن                          | $Q_{\text{Heater}}$ | 38.750   | kWm <sup>-2</sup>                 |
| ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی <sup>(***)</sup> | $h$                 | 100      | Wm <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup>  |
| دمای محیط                                    | $T_{\infty}$        | 300      | K                                 |
| زمان اعمال شار حرارتی                        | $t_c$               | 20       | s                                 |
| زمان داده‌برداری                             | $t_f$               | 30       | s                                 |

<sup>(\*)</sup> لوله از نوع فولاد ASTM 304-کلاس 80s است.

<sup>(\*\*)</sup> گرم‌کن از مدل TBW06-200 است.

<sup>(\*\*\*)</sup> ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی، مربوط به هوای محیط است.

Fig. 4 Temperature contour of the external surface of specimen ( $t=30$  s)

شکل 4 کانتور دمای سطح بیرونی نمونه موردبررسی ( $t = 30$  s)

<sup>2</sup> Semi Infinite Body

<sup>1</sup> Finite Volume Method: (FVM)

همان‌گونه که در نتایج جدول 2 مشهود است، ساده‌سازی صورت‌گرفته در شبیه‌سازی مسئله تأثیر بسیار ناچیزی در دماهای محاسبه‌شده در محل حسگرها خواهد داشت؛ البته شایان‌ذکر است که این فرض تنها برای زمان کوتاه داده‌برداری دارای اعتبار است، زیرا با گذشت زمان بر اثر واپخش<sup>3</sup> حرارت در جسم جامد، اثر شرط مرزی جابه‌جایی و همچنین عیوب احتمالی در سایر نواحی قبل و بعد از ناحیه تحریک در دمای محاسبه‌شده در محل حسگرها تأثیر بیشتری خواهد داشت.

توزیع محیطی غیریکنواخت عیب موجود سبب می‌شود که جمله  $\partial^2 T / \partial \theta^2$  در معادله (1) قابل‌حذف نباشد، اما باید به این نکته توجه داشت که در فرآیند شناسایی، تخمین محل نقص، طول و میانگین عمق کاسته شده از دیواره داخلی لوله حائز اهمیت بوده و توزیع زاویه‌ای از درجه اهمیت به‌مراتب پایین‌تری برخوردار است؛ از این رو در فرآیند تخمین پارامترها به‌جای به دست آوردن توزیع زاویه‌ای نقص موجود که کاری دشوار و بعضاً کم‌اهمیت است، مقدار میانگین عمق از بین رفته تخمین زده می‌شود. در این صورت تعداد پارامترهایی که باید تخمین زده شود شامل سه پارامتر میانگین عمق کاسته شده از سطح داخلی، طول و محل عیب خواهد بود و از سوی دیگر متغیر  $\theta$  در معادله (1) بی‌تأثیر شده و با حذف آن می‌توان حل مسئله را از حالت سه‌بعدی به حالت دوبعدی تقارن محوری تبدیل کرد. با اعمال چنین فرضی در هر مختصه از ناحیه موردبررسی، توزیع دما در راستای محیطی یکنواخت بوده که این امر به سبب تقلیل حسگرهای مورداستفاده و کاهش اندازه ماتریس‌ها موجب تسریع در انجام عملیات ریاضی خواهد شد.

با اعمال فرضیات و ساده‌سازی ممکن، هندسه مسئله جهت شبیه‌سازی عددی در شکل 6 نشان داده شده است. علاوه بر مختصات کلی  $(R, \theta, Z)$  که از ابتدای سیستم لوله تعریف می‌شود، مختصات محلی  $(r, \theta, z)$  از ابتدای مکان قرارگیری گرم‌کن جهت سهولت در معرفی پارامترها تعریف شده است.

جدول 2 مقایسه بردارهای دمای نمونه موردبررسی و مسئله شبیه‌سازی شده

Table 2 Comparison of temperature vectors of the specimen and the simulated problem

| مقدار (K) |                                        |
|-----------|----------------------------------------|
| 319.7550  | جذر میانگین مربعات نمونه موردبررسی     |
| 319.7602  | جذر میانگین مربعات مسئله شبیه‌سازی شده |
| 0.0282    | خطای میانگین مربعات                    |

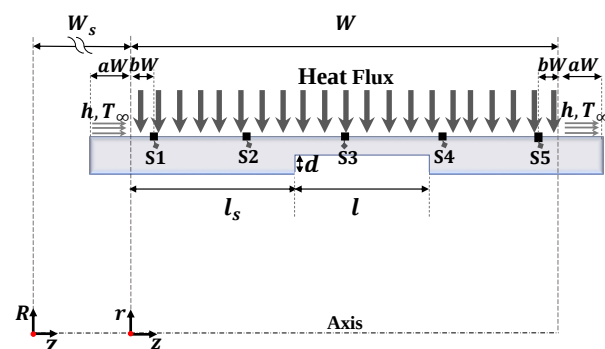


Fig. 6 Direct problem geometry

شکل 6 هندسه مسئله مستقیم

اگر به ازای هر مختصه طولی، تعداد  $N_\theta$  حسگر با فواصل یکسان در راستای محیطی قرار داشته و اگر تعداد مختصه‌های طولی  $N_z$  باشد، در این صورت به تعداد  $N_s = N_z \times N_\theta$  حسگر روی سطح بیرونی لوله قرار گرفته است؛ که برای هرکدام از آن‌ها تعداد  $M$  داده‌ی دما اندازه‌گیری خواهد شد؛ از این رو ماتریس دما و فرم ستونی آن به صورت روابط (8-9) است.

$$T_M = \begin{pmatrix} T_{1,1} & T_{1,2} & \dots & T_{1,M} \\ T_{2,1} & T_{2,2} & \dots & T_{2,M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{N_s,1} & T_{N_s,2} & \dots & T_{N_s,M} \end{pmatrix}_{N_s \times M} \quad (8)$$

$$T = \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_n \\ \vdots \\ T_N \end{pmatrix}_{(N_s \times M) \times 1} \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, N_s \\ j = 1, 2, \dots, M \\ n = (i-1) \times N_s + j \end{matrix} \quad (9)$$

همچنین جذر میانگین مربعات<sup>1</sup> بردار دما با رابطه (10) بیان می‌شود.

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{N_s \times M} (T_n)^2}{N_s \times M}} \quad (10)$$

اگر بردار دمای  $T^{(s)}$  مربوط به نمونه واقعی باشد که ناحیه‌های قبل و بعد از ناحیه تحریک و عیوب این نواحی کاملاً مدل‌سازی شده و بردار دمای  $T^{(sp)}$  مربوط به مسئله شبیه‌سازی شده باشد که صرفاً ناحیه تحریک و بخش کوچکی از ناحیه‌های طرفین (10% عرض ناحیه تحریک از هر طرف) و بدون لحاظ کردن عیوب احتمالی سایر نواحی، مدل‌سازی شده است؛ آن‌گاه خطای میانگین مربعات<sup>2</sup> این بردارهای دما به صورت رابطه (11) تعریف می‌شود.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{N_s \times M} (T_n^{(s)} - T_n^{(sp)})^2}{N_s \times M}} \quad (11)$$

مقادیر به‌دست‌آمده از روابط (11,10) برای هر دو حالت در جدول 2

آورده شده است.

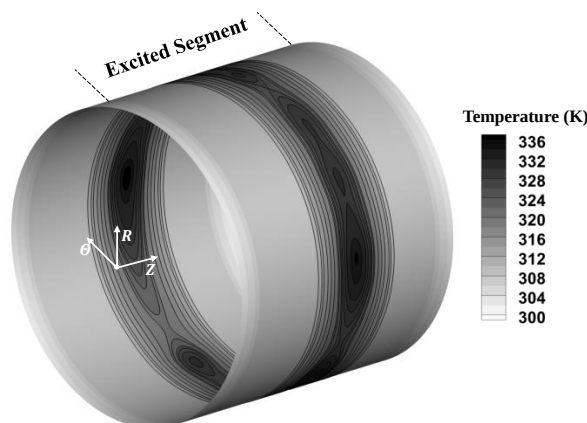


Fig. 5 Temperature contour of the external surface of simulated problem ( $t=30$  s)

شکل 5 کانتور دمای سطح بیرونی مسئله شبیه‌سازی شده ( $t = 30$  s)

<sup>3</sup> Diffusion

<sup>1</sup> Root Mean Square

<sup>2</sup> Root Mean Square Error: (RMSE)

$$\frac{\partial T}{\partial r} = \frac{q \times (r_o - r_i)}{k} \quad r = 1, z \in [0, 1] \quad (22)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad r = 0 \text{ or } r = \beta_1, \beta_3 \leq z \leq \beta_2 + \beta_3 \quad (23)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad z = \beta_3 \text{ or } z = \beta_2 + \beta_3 \quad (24)$$

### 3-3- استقلال از شبکه و گام زمانی

نتایج حاصل از حل عددی معادله حاکم بر مسئله به دلیل ماهیت گذرا هم تابعی از نوع شبکه و هم تابعی از گام زمانی است؛ از این رو نتایج که همان دماهای محاسبه شده در محل حسگرهاست، باید مستقل از اندازه شبکه و گام زمانی باشد. یکی از ساده‌ترین روش‌ها جهت بررسی استقلال از شبکه و گام زمانی بدین صورت است که با فرض یک گام زمانی مشخص و ثابت، اندازه شبکه در هر دو راستای  $r$  و  $z$  با شروع از مقداری دلخواه در هر مرحله نصف می‌شود تا جایی که خطای میانگین مربعات بردارهای دما در دو حالت متوالی از مقدار قابل قبول کمتر شود. سپس با در نظر گرفتن مقدار مطلوب به دست آمده برای اندازه شبکه، مقدار گام زمانی تا حدی کوچک خواهد شد که همانند قبل خطای میانگین مربعات بردارهای دما در دو حالت متوالی و برای زمان‌های یکسان به قدر کافی کوچک شود. شبکه بندی میدان حل مسئله به صورت باسازمان بوده و با توجه به نتایج حاصل در جدول 3 گام‌های مکانی  $\Delta r = (r_o - r_i)/200$  و  $\Delta z = W/800$  و با استناد به نتایج جدول 4 گام زمانی  $\Delta t = 0.25$  s مناسب است و با ریز کردن بیشتر شبکه و یا گام زمانی تغییر بسیار ناچیزی در مقادیر دما ایجاد خواهد شد.

جدول 4 استقلال از شبکه

| Table 3 Grid independency |                      |                      |                      |                   |                       |
|---------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------|-----------------------|
| شماره نمونه               | گام مکانی $\Delta r$ | گام مکانی $\Delta z$ | گام زمانی $\Delta t$ | RMS بردار دما (K) | اختلاف با مقدار پیشین |
| 1                         | $(r_o - r_i)/50$     | $W/200$              | 1                    | 317.3768          | -                     |
| 2                         | $(r_o - r_i)/100$    | $W/400$              | 1                    | 317.3763          | $1.6 \times 10^{-3}$  |
| 3                         | $(r_o - r_i)/200$    | $W/800$              | 1                    | 317.3762          | $3.95 \times 10^{-4}$ |
| 4                         | $(r_o - r_i)/400$    | $W/1600$             | 1                    | 317.3768          | $9.85 \times 10^{-5}$ |

جدول 4 استقلال از گام زمانی

| Table 4 Time step independency |                      |                      |                      |                                  |                       |
|--------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------------------|-----------------------|
| شماره نمونه                    | گام مکانی $\Delta r$ | گام مکانی $\Delta z$ | گام زمانی $\Delta t$ | RMS بردار دما <sup>(*)</sup> (K) | اختلاف با مقدار پیشین |
| 1                              | $(r_o - r_i)/200$    | $W/800$              | 1                    | 317.3762                         | -                     |
| 2                              | $(r_o - r_i)/200$    | $W/800$              | 0.5                  | 317.3869                         | $1.31 \times 10^{-1}$ |
| 3                              | $(r_o - r_i)/200$    | $W/800$              | 0.25                 | 317.3920                         | $6.91 \times 10^{-2}$ |
| 4                              | $(r_o - r_i)/200$    | $W/800$              | 0.125                | 317.3944                         | $3.53 \times 10^{-2}$ |

(\*) دمای محاسبه شده در زمان‌های  $t = 1, 2, 3, \dots, 30$  s با یکدیگر مقایسه شده است.

در شکل 6 مشخصه  $a$  نسبتی از عرض گرم‌کن است که از سایر نواحی قبل و بعد از ناحیه تحریک مدل‌سازی شده است. همچنین  $S5$  تا  $S5$  حسگرهای دمای واقع شده در زیر گرم‌کن هستند و مشخصه  $b$  نسبتی از عرض گرم‌کن است که اولین یا آخرین حسگر به اندازه آن از لبه گرم‌کن فاصله دارد. با توجه به شبیه‌سازی‌های انجام شده در این پژوهش مقادیر مناسب برای پارامترهای  $a$  و  $b$  به ترتیب 0.1 و 0.05 است.

### 3-2- بی‌بعد سازی پارامترها و اصلاح معادلات

مطابق شکل 6 مکان عیب واقع بر سطح داخلی در مختصات محلی با پارامتر  $l_s$  مشخص شده که می‌توان با توجه به محل قرارگیری گرم‌کن از ابتدای لوله محل آن را در مختصات کلی تعیین کرد. پارامترهای هندسی عیب شامل طول و میانگین عمق کاسته شده از دیواره داخلی لوله است که به ترتیب با  $l$  و  $d$  مشخص شده است. با اعمال فرضیات مسئله جمله  $\partial^2 T / \partial \theta^2$  از معادله (1) حذف شده و معادله رسانش در مختصات محلی با معادله (12) و همچنین شرایط مرزی و اولیه معادلات (2-7) به صورت روابط (13-17) بیان می‌شوند.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (12)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad z = -aW, z = (1+a)W \quad (13)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad r = r_i, z \in [-aW, (1+a)W] - [0, W] \quad (14)$$

$$r = r_i + d, z \in [0, W] \quad -k \frac{\partial T}{\partial r} = -q \quad r = r_o, z \in [0, W] \quad (15)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} = h(T_s - T_\infty) \quad r = r_o, z \in [-aW, (1+a)W] - [0, W] \quad (16)$$

$$T(r, \theta, z, 0) = T_\infty \quad (17)$$

همچنین متغیرهایی به صورت رابطه (18) تعریف می‌شود.

$$r^* = \frac{r - r_i}{r_o - r_i} \quad z^* = \frac{z}{W} \quad t^* = \frac{kt}{\rho C_p (r_o - r_i)^2} \quad T^* = T - T_\infty$$

$$\beta_1 = \frac{d}{r_o - r_i} \quad \beta_2 = \frac{l}{W} \quad \beta_3 = \frac{l_s}{W} \quad \beta_2 + \beta_3 \leq 1$$

$$c_1 = \frac{r_i}{r_o - r_i} \quad c_2 = \left( \frac{r_o - r_i}{W} \right)^2 \quad Bi = \frac{h(r_o - r_i)}{k} \quad (18)$$

با جای‌گذاری متغیرهای جدید در روابط (12-17) و سپس با حذف (\*) از معادلات حاصل، معادله رسانش حرارتی و شرایط مرزی و اولیه به صورت روابط (19-24) در خواهد آمد که با حل عددی این معادلات می‌توان توزیع دما را در جداره لوله و در محل حسگرها محاسبه کرد.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^{*2}} + \frac{1}{r^* + c_1} \frac{\partial T}{\partial r^*} + c_2 \frac{\partial^2 T}{\partial z^{*2}} \quad (19)$$

$$\frac{\partial T}{\partial z^*} = 0 \quad z = -a, z = 1 + a \quad (20)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r^*} = -Bi \times T_s \quad r = 1, z \in [-a, (1+a)] - [0, 1] \quad (21)$$

## 4- آنالیز حساسیت

ضریب حساسیت<sup>1</sup> عبارت از اندازه‌گیری میزان تغییر به وجود آمده در متغیر اندازه‌گیری شده به سبب اعمال تغییر در پارامتر مجهول مسئله است. ضریب حساسیت در این مسئله به صورت میزان تغییر حاصل در تابع دما به ازای تغییر در بردار  $\beta = (\beta_1, \beta_2, \beta_3)^T$  خواهد بود. به بیان ریاضی ضریب حساسیت نسبت به متغیر  $\beta_j$  به صورت رابطه (25) تعریف می‌شود.

$$X_{\beta_j} = \frac{\partial T(\beta, t)}{\partial \beta_j} \quad j = 1, 2, 3 \quad (25)$$

هرچه میزان ضریب حساسیت برای یک پارامتر بیشتر باشد، درواقع تابع دما به آن پارامتر حساس‌تر بوده و تخمین آن ساده‌تر خواهد بود [19].

در این مطالعه به خاطر ماهیت غیرخطی مسئله معکوس، از تقریب مشتق عددی جهت محاسبه ضرایب حساسیت استفاده می‌شود؛ ازاین‌رو ضریب حساسیت در حالت کلی با رابطه رابطه (26) بیان می‌شود.

$$X_{\beta_j} = \frac{T(\beta_1, \dots, \beta_j + \delta\beta_j, \dots, \beta_p) - T(\beta_1, \dots, \beta_j, \dots, \beta_p)}{\delta\beta_j} \quad (26)$$

$\delta\beta_j$  به معنای تغییر جزئی در پارامتر  $\beta_j$  است که از ضرب مقدار بسیار کوچک  $\varepsilon$  در پارامتر  $\beta_j$  حاصل می‌شود. مقدار  $\varepsilon$  برابر  $10^{-2}$  در نظر گرفته شده است.

## 4-1- ضرایب حساسیت یک حسگر واحد

در صورتی که حساسیت دمای اندازه‌گیری توسط حسگر  $n$ -ام نسبت به پارامتر  $\beta_j$  را در نظر بگیریم، آن‌گاه در صورتی که تعداد داده‌های اندازه‌گیری شده در گام‌های زمانی برابر  $M$  باشد، بردار حاوی ضرایب حساسیت به صورت رابطه (27) خواهد بود.

$$X_{n,\beta_j} = \frac{\partial T_n(\beta, t)}{\partial \beta_j} = \left( \frac{\partial T_{n,1}}{\partial \beta_j} \quad \frac{\partial T_{n,2}}{\partial \beta_j} \quad \dots \quad \frac{\partial T_{n,M}}{\partial \beta_j} \right)^T \quad n = 1, 2, \dots, N_s \quad j = 1, 2, 3 \quad (27)$$

بدین ترتیب حساسیت دمای اندازه‌گیری توسط حسگر  $n$ -ام نسبت به بردار  $\beta = (\beta_1, \beta_2, \beta_3)^T$  به صورت رابطه (28) است.

$$X_{n,\beta} = \begin{pmatrix} \frac{\partial T_{n,1}}{\partial \beta_1} & \frac{\partial T_{n,1}}{\partial \beta_2} & \frac{\partial T_{n,1}}{\partial \beta_3} \\ \frac{\partial T_{n,2}}{\partial \beta_1} & \frac{\partial T_{n,2}}{\partial \beta_2} & \frac{\partial T_{n,2}}{\partial \beta_3} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial T_{n,M}}{\partial \beta_1} & \frac{\partial T_{n,M}}{\partial \beta_2} & \frac{\partial T_{n,M}}{\partial \beta_3} \end{pmatrix} \quad n = 1, 2, \dots, N_s \quad (28)$$

با در نظر گرفتن مقادیر  $\beta = (0.5 \quad 0.315 \quad 0.3935)^T$  و با حل عددی معادلات (19-24) به ازای بردارهای  $\beta$  و  $\delta\beta$  ضرایب حساسیت برای هر پارامتر در محل حسگرها محاسبه شده و نتایج در شکل‌های 7-9 نشان داده شده است. با توجه به مقدار بردار  $\beta$  محل عیب موجود به‌گونه‌ای است که حسگرهای 1 و 5 در خارج از محل عیب واقع شده‌اند که همین امر موجب می‌شود که نسبت به تغییر پارامترها حساسیت ناچیزی داشته باشند.

همان‌گونه که در شکل‌های 7-9 مشاهده می‌شود میزان حساسیت دما نسبت به یک پارامتر با توجه به مکان عیب موجود در محل حسگرهای مختلف متفاوت خواهد بود. به‌گونه‌ای که حسگر نزدیک ابتدا یا انتهای عیب به تغییر پارامترهای  $l$  و  $l_s$  حساسیت بیشتری دارد؛ ازاین‌رو حسگر 4 نسبت به پارامترهای  $\beta_2$  و  $\beta_3$  حساسیت بیشتری نسبت به سایر حسگرهایی دارد که از ابتدا یا انتهای عیب دور هستند. در عوض حسگرهایی که در فاصله‌ای بین ابتدا و انتهای عیب قرار دارند، نسبت به پارامتر  $d$  حساسیت بیشتری خواهند داشت؛ بنابراین حسگر 3 به پارامتر  $\beta_1$  حساس‌تر است. همچنین لازم به ذکر است که علت ضرایب حساسیت منفی در شکل 9 این است که مطابق رابطه 26 با ایجاد تغییر جزئی  $\delta\beta$  در پارامتر  $\beta_3$  یا به تعبیر دیگر با افزایش پارامتر  $l_s$  ممکن است محل قرارگیری عیب از محل برخی حسگرها دورتر شده و حسگر موردنظر دمای کمتری را اندازه‌گیری کند که موجب منفی شدن مقادیر ضرایب حساسیت می‌شود. تفاوت ضرایب حساسیت در محل حسگرهای مختلف حاکی از آن است که برای تخمین هم‌زمان سه پارامتر مجهول مسئله باید چیدمان حسگرها به‌گونه‌ای باشد که ناحیه تحریک را در به‌طور کامل پوشش دهد.

در شکل 10 تغییرات ضرایب حساسیت به ازای مقادیر مختلف پارامتر  $\beta_1$  در محل حسگر 3 نشان داده شده است؛ ازاین‌رو می‌توان دریافت که با افزایش هرچه بیشتر مقدار عمق کاسته‌شده از دیواره لوله، میزان حساسیت نیز بیشتر خواهد شد، اما با این وجود به ازای مقادیر کم نیز حساسیت از بین نرفته و این امر سبب می‌گردد که همواره امکان تخمین پارامتر  $\beta_1$  صرف‌نظر از مقدار آن امکان‌پذیر باشد. بدیهی است هرچه تعداد حسگرها در راستای طول لوله افزایش یابد، امکان نزدیک بودن حسگر به مکان دقیق شروع و پایان عیب بیشتر شده و در محل آن حسگرها، دما به تغییر پارامترهای  $\beta_2$  و  $\beta_3$  حساس‌تر خواهد بود.

## 4-2- ضرایب حساسیت حسگرهای چندگانه

اگر چندین حسگر به‌طور هم‌زمان استفاده شود، باید حساسیت تمامی حسگرها نسبت به تمامی پارامترها برای به دست آوردن ماتریس حساسیت کلی لحاظ شود؛ بنابراین اگر تعداد حسگرها  $N_s$  باشد؛ با توجه به رابطه (28) ضریب حساسیت کلی به صورت رابطه (29) تعریف می‌شود [20].

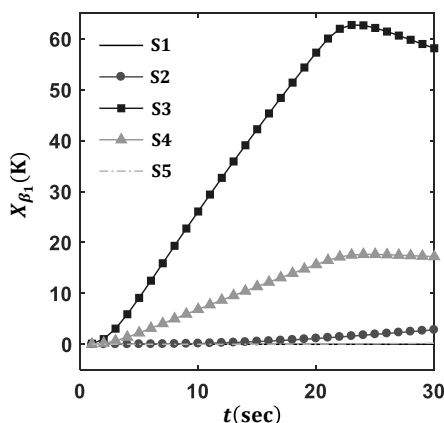


Fig. 7 Variation of the sensitivity coefficients of  $\beta_1$  parameter in the sensors location

شکل 7 تغییرات ضرایب حساسیت پارامتر  $\beta_1$  در محل حسگرها

<sup>1</sup> Sensitivity Coefficient

$$X_{\beta}^T = \begin{pmatrix} X_{1,\beta}^T \\ X_{2,\beta}^T \\ \vdots \\ X_{N_s,\beta}^T \end{pmatrix} \quad n = 1, 2, \dots, N_s \quad (29)$$

### 5- حل مسئله معکوس و تحلیل نتایج

برای شروع کار در تخمین پارامترها باید دماهای اندازه‌گیری شده در آزمایش واقعی در دسترس باشد؛ از این‌رو ابتدا به چگونگی تولید داده‌های آزمایشگاهی شبیه‌سازی شده پرداخته می‌شود و سپس با تعریف تابع هدف، روشی برای کمینه‌سازی آن و به‌روزرسانی پارامترها بیان می‌شود و در پایان صحت روش پیشنهادی برای دو حالت وجود عیب روی سطح داخلی با توزیع محیطی یکنواخت و توزیع غیریکنواخت ارزیابی و نتایج حاصل تحلیل خواهد شد.

#### 5-1- داده‌های آزمایشگاهی شبیه‌سازی شده

پیش از پیاده‌سازی روش‌های مطرح‌شده در مسائل انتقال حرارت معکوس، جهت اطمینان از صحت و کارایی روش در تخمین پارامترها با در نظر گرفتن مقادیری معلوم برای پارامترهایی که باید با روش معکوس تخمین زده شود؛ مسئله موردنظر به صورت مستقیم حل شده و تاریخچه دما<sup>1</sup> در محل حسگرها محاسبه می‌شود. اگر از دماهای محاسبه‌شده به‌عنوان ورودی مسئله معکوس استفاده شود باید دقیقاً به همان مقادیر فرض شده در حل مسئله مستقیم دست یافت، اما همواره مقداری خطا میان مقادیر دقیق و مقادیر تخمینی پارامترها وجود دارد. علت این خطا را باید در تفاوت دمای اندازه‌گیری شده و دمای محاسبه‌شده در فرآیند شبیه‌سازی جستجو کرد که ناشی از عواملی همچون فرضیات لحاظ شده در مدل‌سازی ریاضی مسئله، ثابت فرض کردن خواص ترموفیزیکی ماده و عدم وابستگی به دما، خطای موجود در حل عددی مسئله مستقیم، خطای موجود در ابزار اندازه‌گیری دما و خطای نویز<sup>2</sup> موجود در محیط آزمایش است [21]. برخی از این عوامل خطا را می‌توان به حداقل رساند اما خطای ناشی از نویز موجود در محیط همواره اجتناب‌ناپذیر است؛ از این‌رو اگر پیش از انجام آزمایش و روشن کردن گرم‌کن برای مدت کوتاهی دمای حسگرها اندازه‌گیری شود، آن‌گاه مشاهده می‌گردد که هرچند دمای سطح بیرونی لوله پیش از شروع آزمایش به حالت پایا با محیط رسیده است اما مقادیر اندازه‌گیری شده توسط حسگرها حول دمای اولیه نوسان خواهد داشت که این نوسانات ناشی از نویز محیط است. با اندازه‌گیری مقادیر نویز در محیط آزمایش می‌توان دریافت که نویز موجود حول نقطه صفر دارای یک توزیع گاوسی با انحراف معیار مشخص است [22]. در این پژوهش برای شبیه‌سازی مقادیر نویز، اعداد تصادفی با توزیع گاوسی حول نقطه صفر و با انحراف معیار 0.1 K تولید و به داده‌های شبیه‌سازی شده افزوده شده‌است تا داده‌هایی واقعی‌تر به دست آید.

#### 5-2- بررسی احتمال وجود عیب روی سطوح داخلی لوله

همان‌گونه که در بخش 2 عنوان شد در صورت وجود عیب روی سطح داخلی لوله، دمای سطح بیرونی آن در محل عیب به صورت موضعی نسبت به محل بدون عیب افزایش خواهد داشت؛ بنابراین با در دست داشتن تاریخچه دما در محل حسگرها برای لوله سالم می‌توان از آن به‌عنوان مرجع جهت تشخیص وجود یا عدم وجود عیب استفاده کرد. برای به دست آوردن اطلاعات مربوط

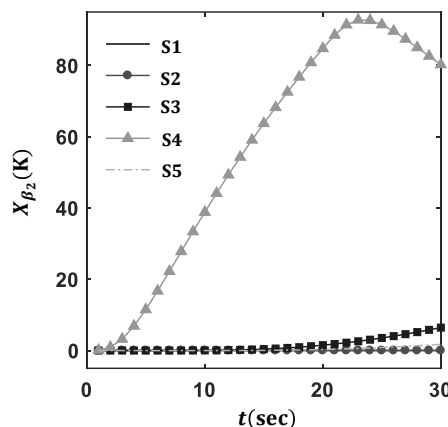


Fig. 8 Variation of the sensitivity coefficients of  $\beta_2$  parameter in the sensors location

شکل 8 تغییرات ضرایب حساسیت پارامتر  $\beta_2$  در محل حسگرها

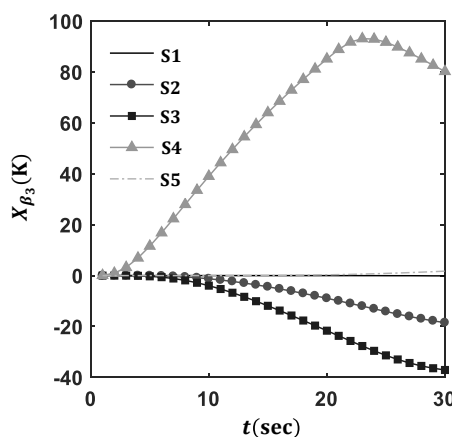


Fig. 9 Variation of the sensitivity coefficients of  $\beta_3$  parameter in the sensors location

شکل 9 تغییرات ضرایب حساسیت پارامتر  $\beta_3$  در محل حسگرها

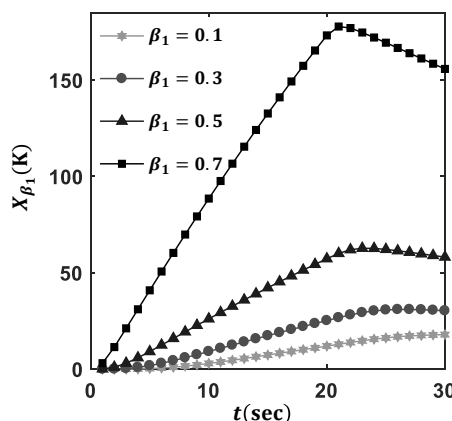


Fig. 10 The variation of the sensitivity coefficients of the  $\beta_1$  parameter for different values

شکل 10 تغییرات ضرایب حساسیت پارامتر  $\beta_1$  به ازای مقادیر مختلف

<sup>1</sup> Temperature History

<sup>2</sup> Noise

تقریب مرتبه اول تیلور به صورت رابطه (34) است که با جای‌گذاری آن در رابطه (33)، معادله تخمین گر به صورت رابطه (35) خواهد بود.

$$T(t, \beta^{p+1}) = T(t, \beta^p) + X^T(\beta^{p+1} - \beta^p) \quad (34)$$

$$\beta^{p+1} = \beta^p + \Delta\beta \quad \Delta\beta = [X^T X]^{-1} X^T [Y - T(t, \beta)] \quad (35)$$

معیار توقف نیز به صورت رابطه (36) تعریف می‌شود.

$$\mu = \frac{|\beta^{p+1} - \beta^p|}{|\beta^p| + \xi} \quad (36)$$

فرآیند تکرار مسئله تا جایی ادامه می‌یابد که  $\mu \leq 10^{-6}$  گردد؛ در این صورت پاسخ نهایی مسئله همان مقدار به‌دست‌آمده برای بردار  $\beta$  خواهد بود. در رابطه (36) پارامتر  $\xi$  برای جلوگیری از صفر شدن مخرج کسر در حالت شرط اولیه صفر لحاظ شده که مقدار آن برابر  $10^{-10}$  فرض شده است [21].

در شکل 11 روند فرآیند شناسایی عیب از شروع تا پایان نشان داده شده است. در صورت تشخیص وجود عیب روی سطح داخلی لوله، با انتخاب یک حدس اولیه مناسب برای پارامترها، مسئله مستقیم یک‌بار برای به دست آوردن تاریخچه دما در محل حسگرها و به تعداد پارامترهای مجهول مسئله برای محاسبه ضرایب حساسیت حل خواهد شد؛ سپس به کمک رابطه (35) مقادیر جدید برای پارامترها محاسبه شده و شرط همگرایی بررسی می‌گردد. در صورت عدم همگرایی مسئله، پارامترهای محاسبه‌شده به‌عنوان حدس اولیه انتخاب شده و این فرآیند تا زمان ارضای شرط همگرایی ادامه می‌یابد. لازم به ذکر است که هر بار که مسئله مستقیم فراخوانی می‌شود، باید هندسه مسئله مجدداً ایجاد و شبکه‌بندی شود و با اعمال شرایط مرزی و اولیه، معادله رسانش حرارتی به‌منظور به دست آوردن تاریخچه دما در محل حسگرها به صورت عددی حل شود.

### 5-3-1- عیب با توزیع محیطی یکنواخت

با انتخاب مقدار دقیق  $\beta = (0.5 \ 0.315 \ 0.3935)^T$  داده‌های آزمایشگاهی شبیه‌سازی‌شده برای مسئله مستقیم تولید شده است. در این حالت باید با کمترین میزان خطا روبرو باشیم؛ زیرا هیچ‌گونه توزیع محیطی غیریکنواخت برای عیب واقع بر سطوح داخلی وجود ندارد و تنها خطای تأثیرگذار در تخمین پارامترها همان خطای نویز است.

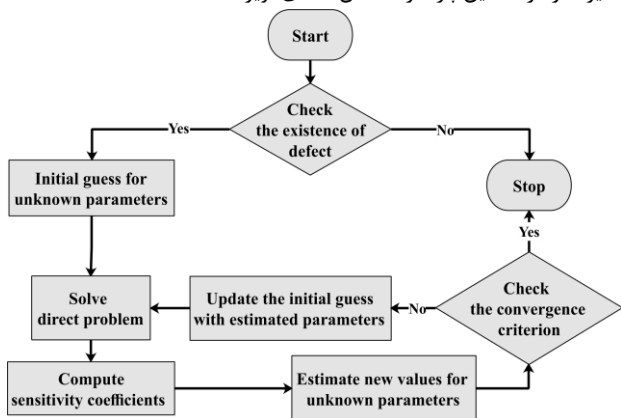


Fig. 11 Flow chart of the process for parameter estimation

شکل 11 روند نمای فرآیند تخمین پارامترها

به حالت مرجع می‌توان با انجام آزمایش در شرایط یکسان روی یک نمونه سالم و مشابه لوله موردبررسی اطلاعات لازم را به دست آورد. راهکار ساده‌تر برای به دست آوردن این اطلاعات مدل‌سازی ریاضی و حل عددی معادله رسانش حرارتی مطابق بخش 3 است، اما با این تفاوت که هیچ‌گونه عیبی روی سطح داخلی لوله وجود ندارد. بدیهی است که در صورت وجود نقص جذر میانگین مربعات دمای اندازه‌گیری شده و دمای حالت مرجع دارای اختلاف خواهد بود که بخش جزئی این اختلاف مربوط به نویز موجود در محیط و سایر عوامل احتمالی خطا و بخش اعظم آن از افزایش دمای سطح خارجی لوله در محل نقص ناشی می‌شود؛ ازاین‌رو برای شرایطی که میزان عمق کاسته شده از دیواره داخلی لوله به‌قدری باشد که تخمین آن ارزشمند تلقی گردد می‌توان با اتخاذ معیاری مانند  $\gamma$  و در صورت برقرار بودن رابطه (30) از وجود عیب روی سطح داخلی لوله مطمئن شد و به تخمین پارامترهای آن پرداخت.

$$\text{RMSE}(T_{\text{ref}}, T_{\text{measured}}) \geq \gamma \quad (30)$$

مقدار  $\gamma$  با توجه به زمان کوتاه اعمال حرارت و افزایش کم درجه حرارت سطح برابر 1 K در نظر گرفته شده است.

### 5-3-2- تخمین پارامترها به روش معکوس

با در دست داشتن دمای اندازه‌گیری شده و دمای محاسبه‌شده به ازای حدس اولیه برای پارامترهای نامشخص، در حالت کلی تابع هدف<sup>1</sup> به صورت اختلاف بین دمای اندازه‌گیری شده و دمای محاسبه‌شده به صورت رابطه (31) تعریف می‌شود.

$$S(\beta) = \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{N_s} (Y_n - T_n(t_k, \beta))^2 \quad n = (i-1) \times N_s + j \quad (31)$$

$Y$  بردار دمای اندازه‌گیری‌شده و  $T$  بردار دمای محاسبه‌شده است.

تاکنون روش‌های بسیار متنوعی جهت کمینه‌سازی تابع هدف پیشنهاد شده است که پرکاربردترین آن‌ها روش جستجوی مستقیم<sup>2</sup>، روش گرادیان (گرادیان مزدوج<sup>3</sup>، گاوس-نیوتن<sup>4</sup>، لونبرگ-مارکارد<sup>5</sup> و ...) و روش الحاقی<sup>6</sup> است [23]. در مسائل غیرخطی تنها در صورتی که تعداد پارامترهای نامشخص محدود باشد، روش‌های گرادیان پیشنهاد می‌شود. ازاین‌رو با توجه به ماهیت غیرخطی مسئله و وجود تنها سه پارامتر نامشخص روش گاوس-نیوتن از میان روش‌های گرادیان جهت کمینه‌سازی تابع هدف استفاده شده است.

برای به دست آوردن معادله تخمین گیر، از تابع هدف نسبت به هریک از پارامترهای  $\beta = (\beta_1, \beta_2, \beta_3)^T$  به صورت رابطه (32) مشتق گرفته شده و حاصل برابر صفر قرار داده می‌شود که با توجه به تعریف ماتریس حساسیت به صورت رابطه (33) نیز نوشته می‌شود.

$$\frac{\partial S(\beta)}{\partial \beta} = -2 \sum_{n=1}^{N_s} \frac{\partial T(t, \beta)}{\partial \beta} [Y_n - T_n(t, \beta)] = 0 \quad (32)$$

$$2X^T [T(t, \beta) - Y] = 0 \quad (33)$$

<sup>1</sup> Cost Function

<sup>2</sup> Direct Search

<sup>3</sup> Conjugate Gradient

<sup>4</sup> Gauss-Newton

<sup>5</sup> Levenberg-Marquart

<sup>6</sup> Adjoint Method

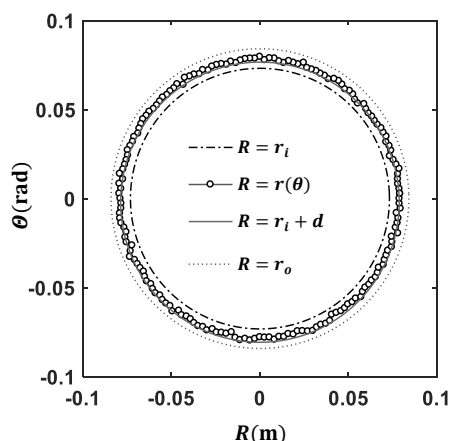


Fig. 13 Defect with the peripheral non-uniform distribution

شکل 13 عیب با توزیع محیطی غیریکنواخت

جایی که حل مسئله مستقیم با شبیه‌سازی یک مسئله تقارن محوری به دست می‌آید، داده‌های اندازه‌گیری شده در هر مقطع عرضی از طول لوله میانگین دماهای اندازه‌گیری شده توسط حسگرهای محیطی در همان مقطع خواهد بود. از طرفی بدیهی است که خطای تخمین پارامترها با متوسط‌گیری داده‌های دما افزایش می‌یابد؛ از این‌رو باید به این سؤال پاسخ داده شود که آیا این مقدار خطا قابل‌پذیرش است یا خیر؟

مانند حالت قبل با انتخاب  $\beta = (0.5 \ 0.315 \ 0.3935)^T$  مقدار دقیق پارامترها ولی با داده‌های آزمایشگاهی متفاوت که در حالت سه‌بعدی و برای یک نمونه دارای عیب با توزیع محیطی غیریکنواخت تولید شده است، پارامترها تخمین زده شده‌اند. با توجه به نتایج جدول 6 و نحوه همگرایی پارامترها در شکل 14 می‌توان دریافت که در این حالت تعداد تکرار مسئله و خطای حاصل نسبت به حالت قبل بیشتر شده است، اما با این حال بیشترین مقدار خطا 2.51% است که با توجه به کاهش چشم‌گیر زمان حل و عدم نیاز به دقت بسیار زیاد در تخمین پارامترها کاملاً قابل‌قبول است.

## 6- نتیجه‌گیری

در این پژوهش روشی نوین در شناسایی و تخمین دقیق پارامترهای هندسی عیب واقع بر سطوح داخلی لوله‌ها معرفی شد. مهم‌ترین نقاط قوت این روش استفاده از تجهیزات ارزان‌قیمت و ساده، تخمین تمامی پارامترهای هندسی عیب موجود با دقت بالا و در مجموع صرف زمان بسیار کم در انجام یک فرآیند شناسایی جامع و کامل است. پژوهش حاضر برای یک سیستم آفلاین ارزیابی و صحت آن بررسی شد. برای به‌کارگیری روش معرفی‌شده برای حالت آینلاین باید معادلات انرژی، ناویر-استوکس و در صورت لزوم معادلات آشفستگی به‌طور هم‌زمان حل شوند؛ از این‌رو به اطلاعاتی از قبیل دبی جریان، مشخصات ترموفیزیکی سیال و سایر پارامترهای دخیل در معادلات جریان نیاز است. از سوی دیگر افزایش تعداد معادلات موجب افزایش زمان حل نیز می‌شود، اما با این حال پیاده‌سازی این روش برای حالت آینلاین با فرضیات و ساده‌سازی‌های قابل‌قبول می‌تواند قدمی مثبتی در تکمیل این پژوهش باشد.

خطای پارامترهای تخمین‌زده‌شده برای این حالت در جدول 5 آورده شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رفت خطایی بسیار ناچیز در تخمین پارامترها وجود دارد که صحت روش را تأیید می‌کند. همچنین با توجه به نمودار همگرایی پارامترها در شکل 12 می‌توان دریافت که علی‌رغم وجود اختلاف بین مقادیر حدس اولیه و مقادیر دقیق پارامترها، این مسئله با تکرار بسیار کم همگرا می‌شود که نشان از سرعت مطلوب این روش در فرآیند شناسایی است. همچنین لازم به‌ذکر است که طبق بررسی‌های صورت گرفته در این پژوهش، روش گاوس-نیوتن برای این مسئله دارای همگرایی سریع‌تر و تخمین دقیق‌تر نسبت به روش جستجوی مستقیم و گرادیان مزدوج است؛ از این‌رو به‌عنوان روش کمینه‌سازی تابع هدف انتخاب شده است.

## 5-3-2 عیب با توزیع محیطی غیریکنواخت

در این حالت داده‌های آزمایشگاهی برای نمونه‌ای با توزیع غیریکنواخت محیطی برای عیب موجود تولید شده است. بدین‌صورت که با فرض این‌که میانگین عمق کاسته شده از دیواره لوله برابر 50% ضخامت جداره لوله باشد، اعداد تصادفی با انحراف از معیار  $10^{-2}$  حول این مقدار میانگین تولید شده است (شکل 13). اگر از تمامی بردارهای شعاعی که معرف نقاط سطح داخلی در محل عیب هستند میانگین گرفته و شعاع داخلی لوله را از آن کسر کنیم؛ آن‌گاه مقدار حاصل برابر میانگین عمق کاسته شده خواهد شد. از نقاط تولیدشده یک منحنی نرَبز<sup>1</sup> عبور داده تا سطحی هموار برای ایجاد هندسه مسئله به دست آید. در این حالت با توجه به توزیع محیطی غیریکنواخت عیب، حسگرهای محیطی مقادیری دارای اختلاف را اندازه می‌گیرند، اما از آن

جدول 5 خطای نسبی بین مقادیر دقیق و تخمین‌زده‌شده پارامترها (توزیع محیطی یکنواخت)

| پارامتر   | مقدار دقیق | مقدار تخمین‌زده‌شده | خطای نسبی (%)         |
|-----------|------------|---------------------|-----------------------|
| $\beta_1$ | 0.5        | 0.49999             | $9 \times 10^{-4}$    |
| $\beta_2$ | 0.315      | 0.31512             | $5.14 \times 10^{-2}$ |
| $\beta_3$ | 0.3935     | 0.39351             | $4.72 \times 10^{-2}$ |

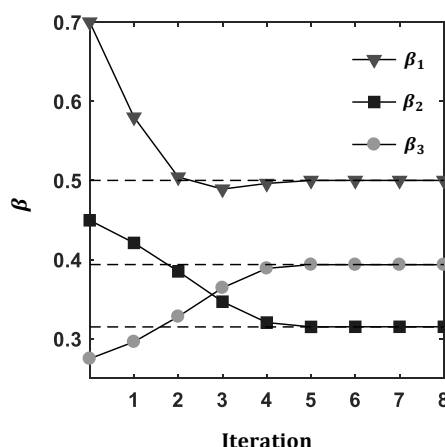


Fig. 12 Convergence history of the unknown parameters (peripheral uniform distribution)

شکل 12 همگرایی پارامترهای مجهول (توزیع محیطی یکنواخت)

<sup>1</sup> Non-uniform rational B-spline: (NURBS)

- [11] C. H. Cheng, M. H. Chang, Shape identification by inverse heat transfer method, *Transactions-American Society of Mechanical Engineers Journal of Heat Transfer*, Vol. 125, No. 2, pp. 224-231, 2003.
- [12] G. Inglese, An inverse problem in corrosion detection, *Inverse problems*, Vol. 13, No. 4, pp. 977, 1997.
- [13] J. Cheng, M. Choulli, X. Yang, An Iterative BEM for the Inverse Problem of Detecting Corrosion in a Pipe, *Numerical Mathematics Theory Methods and Applications*, 2005.
- [14] M. Siavashi, F. Kowsary, E. Abbasi-Shavazi, Detection of flaws in a two-dimensional body through measurement of surface temperatures and use of conjugate gradient method, *Computational Mechanics*, Vol. 46, No. 4, pp. 597-607, 2010.
- [15] D. Mukherjee, S. Saha, S. Mukhopadhyay, Inverse mapping of magnetic flux leakage signal for defect characterization, *NDT & E International*, Vol. 54, No. Supplement C, pp. 198-208, 2013.
- [16] H. Vanaei, A. Eslami, A. Egbewande, A review on pipeline corrosion, in-line inspection (ILI), and corrosion growth rate models, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 149, pp. 43-54, 2017.
- [17] H. Yapıcı, B. Albayrak, Numerical solutions of conjugate heat transfer and thermal stresses in a circular pipe externally heated with non-uniform heat flux, *Energy Conversion and Management*, Vol. 45, No. 6, pp. 927-937, 2004.
- [18] J. V. Beck, B. Blackwell, C. S. Clair Jr, *Inverse heat conduction*, 1<sup>st</sup> Edition, pp. 1-78: Wiley & Interscience, 1985.
- [19] B. Popescu, Y. Scudeller, T. Brousse, B. Garnier, Thermal characterization of dielectric thin films using an improved genetic algorithm, *Superlattices and Microstructures*, Vol. 35, No. 3, pp. 239-252, 2004.
- [20] M. N. Ozisik, *Inverse heat transfer: fundamentals and applications*, 1<sup>st</sup> Edition, pp. 35-114, New York: Taylor & Francis, 2000.
- [21] F. Albouchi, M. Fetoui, F. Rigollet, M. Sassi, S. Ben Nasrallah, Optimal design and measurement of the effective thermal conductivity of a powder using a crenel heating excitation, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 44, No. 11, pp. 1090-1097, 2005.
- [22] A. Adili, C. Kerkeni, S. Ben Nasralla, Estimation of thermophysical properties of fouling using inverse problem and its impact on heat transfer efficiency, *Solar Energy*, Vol. 83, No. 9, pp. 1619-1628, 2009.
- [23] Y. Jamy, M. N. Ozisik, J. P. Bardou, A general optimization method using adjoint equation for solving multidimensional inverse heat conduction, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 34, No. 11, pp. 2911-2919, 1991.

جدول 6 خطای نسبی بین مقادیر دقیق و تخمین‌زده‌شده پارامترها (توزیع محیطی غیریکنواخت)

Table 6 relative error between exact parameters and estimated parameters (peripheral non-uniform distribution)

| پارامتر   | مقدار دقیق | مقدار تخمین‌زده‌شده | خطای نسبی (%) |
|-----------|------------|---------------------|---------------|
| $\beta_1$ | 0.5        | 0.51255             | 2.51          |
| $\beta_2$ | 0.315      | 0.30943             | 1.76          |
| $\beta_3$ | 0.3935     | 0.39877             | 1.33          |

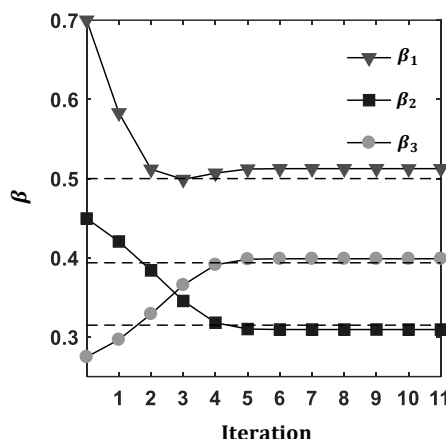


Fig. 14 Convergence history of the unknown parameters (peripheral non-uniform distribution)

شکل 14 همگرایی پارامترهای مجهول (توزیع محیطی غیریکنواخت)

#### 7- مراجع

- [1] G. P. Guidetti, G. L. Rigosi, R. Marzola, The use of polypropylene in pipeline coatings, *Progress in Organic Coatings*, Vol. 27, No. 1, pp. 79-85, 1996.
- [2] L. Yang, *Techniques for corrosion monitoring*, 1<sup>st</sup> Edition, pp. 293-310: Elsevier, 2008.
- [3] S. R. D. H. Harald, M. Gaute, K. R. John, W. K. R, FSM-non-intrusive monitoring of internal corrosion, erosion and cracking, *Anti-Corrosion Methods and Materials*, Vol. 42, No. 6, pp. 3-6, 1995.
- [4] V. S. Agarwala, P. L. Reed, S. Ahmad, Corrosion Detection and Monitoring - A Review, in *Corrosion 2000 Conference*, Orlando, Florida, 2000.
- [5] A. Groysman, *Corrosion for everybody*, 1<sup>st</sup> Edition, pp. 189-227: Springer Science & Business Media, 2009.
- [6] R. Khamedi, E. Poursaeidi, M. Jabbari, An Investigation to Corrosion of Stainless Steels by Acoustic Emission Method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 195-200, 2014. (in Persian)
- [7] P. T. Hsu, Y. H. Liu, S. G. Wang, C. o. K. Chen, An inverse approach for estimation of the surface heat flux distribution on a horizontal elliptical tube with laminar film condensation, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 85, No. 2, pp. 189-195, 2002.
- [8] C. H. Cheng, C. C. Cheng, S. K. Chou, Inverse geometry design problem in optimizing hull surfaces, *Journal of ship research*, Vol. 42, No. 2, pp. 79-85, 1998.
- [9] W. L. Chen, Y. C. Yang, H. L. Lee, Three-Dimensional Pipe Fouling Layer Estimation by Using Conjugate Gradient Inverse Method, *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, Vol. 55, No. 9, pp. 845-865, 2009.
- [10] C. R. Su, C. K. Chen, Geometry estimation of the furnace inner wall by an inverse approach, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, No. 19, pp. 3767-3773, 2007.