

## تحلیل قابلیت اعتماد یک لوله تحت تنش زمامند حاصل از گاز متحرک فشار و دما بالا

علی عبداللهی<sup>۱</sup>، محمد شیرزادی<sup>۲</sup>

abdollahifar@mut.ac.ir

mshirzadifar@mut.ac.ir

<sup>۱</sup> استادیار، مجتمع هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران.

<sup>۲</sup> نویسنده مسئول، مجتمع هوادریا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ایران.

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۸

### چکیده

قابلیت اعتماد بر پایه آمار و احتمالات و معرف احتمال سالم ماندن محصول تولیدی است. در سال‌های اخیر، مهندسی قابلیت اعتماد مورد توجه محققان بسیاری قرار گرفته است. از مهم‌ترین پارامترهای طراحی سازه، قابلیت اعتماد بالای محصولات به علت ارتباط مستقیم با سلامتی کاربران و کارکرد صحیح محصولات صنعتی است. در پژوهش حاضر، ایجاد پیوند بین روش حل عددی المان محدود بر مبنای کد نویسی در نرم‌افزار متلب با تحلیل قابلیت اعتماد در لوله‌های سکوها‌های نفتی جانمایی شده در بستر دریا و متأثر از شرایط مرزی حاکم بر فیزیک دریاست. بنابراین در این پژوهش برای نخستین بار یک لوله تحت بار ناشی از حرکت گاز داغ و پرفشار درون آن، با استفاده از روش المان محدود و با کدنویسی در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی و به صورت دینامیکی و زمانمند تحلیل شده است. به منظور صحت‌گذاری کد حاضر، خروجی آن با نتایج نرم‌افزار انسیس و سایر نتایج موجود مقایسه شده است. کد حاضر با دقت ایجاد اعداد تصادفی با تابع چگالی احتمال یکنواخت تا مقدار  $\frac{1}{100}$  می‌تواند با تعداد ۱۰۵ نمونه شبیه‌سازی شده، احتمال زوال و قابلیت اعتماد لوله تحت بار ناشی از حرکت گاز داغ و پرفشار درون آن را به ترتیب ۰/۹۹۹۴۱ و ۰/۰۰۰۵۹ پیش‌بینی نماید که با توجه به احتمال زوال پایین لوله و مطابقت با ویژگی‌های آماری گفته‌شده، دارای قابلیت اعتماد بالایی است.

**واژه‌های کلیدی:** جریان صنایع نفت و گاز، لوله، قابلیت اعتماد، دما و فشار بالا، تحلیل تنش دینامیکی.

## ۱. مقدمه

شاخه‌ای از تئوری احتمالات، به نام نظریه قابلیت اعتماد چارچوبی متین و منطقی برای به حساب آوردن موارد عدم قطعیت در طراحی را در اختیار می‌گذارد. نظریه قابلیت اعتماد همچنین چشم‌اندازِ اختیارِ روشی سیستماتیک را، در انتخاب ضریب اطمینان مناسب، برای موارد استفاده خاص به وجود می‌آورد. در تعبیری کلی، قابلیت اعتماد مقیاسی است که می‌توان توانایی هر قسمت یا کل یک وسیله مصنوع یا سیستم را برای عملکرد با کفایت، در شرایطی که برای آن در نظر گرفته شده است را با آن سنجید [۱].

قابلیت اعتماد همیشه معرف نوعی احتمال است که بین عملکرد سیستم با آنچه در عمل از آن انتظار می‌رود، نوعی ارتباط برقرار می‌کند. توصیف رفتار سیستم‌های سازه‌ای به‌طور اجتناب‌ناپذیری به برخی منابع عدم قطعیت یا پارامترهای تصادفی وابسته است. به‌ویژه در مورد سازه‌های مهندسی این عدم قطعیت ممکن است؛ به‌صورت تغییرات و پراکندگی در هندسه سازه، نیروهای خارجی، شرایط محیطی، شرایط مرزی عوامل هندسی یا مشخصات مواد ظاهر شوند. در نتیجه واکنش سازه‌ها نیز اساساً دارای رفتاری تصادفی خواهد بود؛ بنابراین ضرورت دارد که در برآورد رفتار سازه‌ها این عدم قطعیت در پارامترهای سیستم در نظر گرفته شود. به کمک نظریه قابلیت اعتماد می‌توان عدم قطعیت‌های ناشی از طبیعت آماری پارامترهای سازه‌ای را به‌صورت روابط ریاضی درآورده و ملاحظات ایمنی و عملکرد را به‌طور کمی را وارد روند طراحی نمود [۲، ۳].

در این زمینه برای نمونه می‌توان به روش مرتبه اول قابلیت اعتماد یا روش دقیق‌تری مانند روش شبیه‌سازی مونت کارلو اشاره کرد.

برای نخستین بار پیوند بین روش تحلیل المان محدود و روش تحلیل قابلیت اعتماد مرتبه اول در سال ۱۹۸۳ توسط کیورگیانو تیلور [۴] به وجود آمد. در سال ۱۹۸۸ کیورگیانو و همکارش روش طراحی احتمالی و تحلیل قابلیت اعتماد مبتنی بر المان محدود را به وجود آوردند [۳]. کیورگیانو و

هاوکاسدر در تحقیقی در سال ۲۰۰۳ علاوه بر گسترش تحلیل قابلیت اعتماد، تحلیل حساسیت را نیز به آن افزودند که کمک بسیار زیادی به شناخت میزان تأثیر پارامترها در طراحی نمود [۵]. در سال ۲۰۰۴ هوانگو همکارش قابلیت اعتماد سازه‌ی هواپیما با نگرش آسیب‌های غیرمترقبه را محاسبه کرده آن‌ها اثر مواد کامپوزیتی را در محاسبات لحاظ نمودند [۶]. در زمینه تحلیل تنش، در سال ۲۰۰۶ کیمو همکاران در تحقیقی، تحلیل تنش حرارتی برای نمونه‌های آزمایشگاهی انجام دادند، سپس با استفاده از این تحلیل تنش، خستگی نمونه استاندارد تحت کشش را بررسی نمودند [۷]. در سال ۲۰۰۱ جوشی و همکاران در تحقیقی برنامه‌ای رایانه‌ای تدوین نموده و با استفاده از آن تحلیل تنش سیستم پایینگ را انجام دادند [۸]. در سال ۲۰۱۳ جین و آگراوال در تحقیقی تحلیل سازه- انتقال حرارت را برای منیفولد یک موتور دیزل توسط المان محدود انجام دادند [۹]. در سال ۲۰۱۳ بیان و لی تنش حرارتی و عمر خستگی روتور یک توربین بخار ۱۰۰۰ مگاواتی را با استفاده از تحلیل المان محدود به کمک نرم‌افزار انسیس انجام دادند [۱۰].

در زمینه تحلیل لوله‌ها با تئوری‌های دوبعدی پوسته تحقیقاتی صورت پذیرفته است. چان و هورگان در سال ۱۹۹۹ با استفاده از یک روش تحلیلی تنش‌های ایجادشده در دیسک‌های دوار را، بر اساس تئوری الاستیسیته و با فرض تنش صفحه‌ای و کرنش صفحه‌ای مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مدول الاستیسیته را به‌صورت قانون توزیع توانی در راستای شعاع و خواص مادی دیگر را ثابت فرض نمودند [۱۱]. چن و همکاران در سال ۲۰۰۷ یک روش تحلیلی برای به دست آوردن تنش‌ها و جابه‌جایی دیسک دوار مدرج تابعی بر اساس تئوری سه‌بعدی ارائه نمودند [۱۲].

در سال‌های اخیر، روش‌های عددی تحلیل و ارزیابی قابلیت اعتماد لوله‌ها مورد تنش زمانمند در کاربردهای ساحلی و فراساحلی در خلیج فارس، همچنین فضایی مورد توجه بسیاری از محققان داخلی قرار گرفته است [۱۳-۱۴].

در نمونه‌ای از این نوع تحلیل‌ها، توسط کاردان و همکارانش به بررسی تأثیر امواج لرزه‌ای و چگونگی پاسخ‌دهی لوله‌های

نفوذ صوت درون لوله‌ها بیشتر می‌شود که به ایجاد تنش زمانمند دینامیکی در لوله منجر می‌شود.

بنابراین در این پژوهش برای نخستین بار یک لوله تحت بار ناشی از حرکت گاز داغ و پرفشار درون آن، با استفاده از روش المان محدود و با کدنویسی در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی و به‌صورت دینامیکی و زمانمند تحلیل شده است. سپس تحلیل قابلیت اعتماد مدل مذکور تحت بارگذاری دینامیکی ناشی از حرکت گاز پرفشار داغ که در لوله جریان دارد با روش شبیه‌سازی مونت کارلو که هم‌اکنون دارای بالاترین سطح دقت در میان روش‌های تحلیل قابلیت اعتماد است، انجام شده است.

روش مونت کارلو با غلبه بر پیچیدگی‌های حاکم بر شرایط متفاوت محیطی، مرزی و پارامترهای هندسی سازه تحت بررسی، می‌تواند قابلیت اعتماد سازه را بر مبنای فرآیندهای واقعی و رفتارهای تصادفی گسترده‌تری از لحاظ زمانی نسبت به سایر روش‌ها پیش‌بینی نماید. این در حالی است که سایر روش‌های دینامیکی مانند مارکوف و بیزین دارای محدودیت‌هایی شامل تعداد اجزاء و حالت‌های تصادفی، نوع توزیع خرابی یا تعمیر و سایر حالاتی که خروجی یک سامانه دینامیکی به‌عنوان ورودی سامانه دینامیکی دیگری قرار می‌گیرد؛ است. اما روش مونت کارلو با قابلیت بررسی فرایندهای تصادفی و واقعی شامل هیچ‌یک از محدودیت‌های فوق‌الذکر نیست. درعین حال زمان انجام محاسبات یکی از محدودیت‌های اصلی روش مونت کارلو محسوب می‌شود که با توجه به رایانه در دسترس دقت اعداد تصادفی با تابع چگالی احتمال یکنواخت تا  $\frac{1}{100}$  در این پژوهش لحاظ و به‌عنوان محدودیت اصلی حل مسئله در نظر گرفته شده است.

## ۲. تئوری قابلیت اعتماد

در تئوری قابلیت اعتماد برای محاسبه‌ی احتمال زوال یک سیستم می‌بایست انتگرال رابطه (۱) محاسبه شود، این انتگرال بیانگر احتمال زوال یک سیستم است.

$$P_f = Prob[g(x) \leq 0] = \int_{g(x) \leq 0} f(x) dx \quad [1] \quad (1)$$

فراساحلی و ساحلی درون بستر دریا و روی بافت خاک بر قابلیت اعتماد لوله‌ها پرداخته شده است [۱۵].

روش یادگیری ماشین نیز به‌عنوان یک روش تکمیلی در کنار بررسی قابلیت اعتماد و ارزیابی آسیب‌پذیری لوله‌های مورد تنش زمانمند حاصل از انتقال سوخت در شرایط بحرانی محیطی مانند زلزله در سال ۲۰۲۴ توسط حقیقی و همکاران ارائه شد [۱۶].

با توجه به معادله‌های حاکم بر فیزیک دریا، نواحی مختلف درون بستر دریا از لحاظ زمانی و مکانی همواره تحت تأثیر شرایط متفاوت، متغیر دمایی و فشار ناشی از امواج قرار دارند. بنابراین لوله‌های مورد استفاده در سکوها‌ی نفتی و گازی در محیط دریا که از آن‌ها به‌منظور انتقال سیالاتی مانند گاز، نفت، بخار و اسید استفاده می‌شود، نیز در معرض تنش‌های زمانمند ناشی از تأثیر امواج و محیط دریا قرار دارند؛ بنابراین، تحلیل قابلیت اعتماد لوله‌ها تحت تنش دینامیکی حاصل از انتقال گاز متحرک فشار و دمابالا که متأثر از فیزیک دریا است، در کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری لوله‌های مانیسمان در سکوها‌ی نفتی و گازی و کاهش تأثیر مخرب زیست‌محیطی دریا، از اهمیت زیادی برخوردار است.

در پژوهش‌های ارائه‌شده توسط محققان پیشین، تمرکز بر ایجاد پیوند بین روش تحلیل المان محدود یا استفاده از نمونه‌های آزمایشگاهی با تحلیل قابلیت اعتماد در انواع مختلف استحکامات سازه‌های هوایی و دیسک‌های دوار بود اما نوآوری اصلی در پژوهش حاضر، ایجاد پیوند بین روش حل عددی المان محدود بر مبنای کد نویسی در نرم‌افزار متلب با تحلیل قابلیت اعتماد در لوله‌های سکوها‌ی نفتی جانمایی شده در بستر دریا و متأثر از شرایط مرزی حاکم بر فیزیک دریاست.

به دلیل قرار گرفتن لوله‌ها در بستر دریا و وجود امواج مختلف که کاملاً وابسته به شرایط فیزیکی محیط دریا در طول شبانه‌روز است، بارهای دمایی و نیرویی وارد بر لوله‌های سکوها‌ی نفتی و گازی در گذر زمان تغییر می‌کنند. زمان ایجاد تغییرات دمایی و نیرویی‌مورد اشاره گاهی از سرعت

برای حالتی که در آن اعداد تصادفی با تابع چگالی احتمال یکنواخت در فاصله‌ای دلخواه مطلوب باشد، طی دو مرحله زیر حاصل می‌شود.

نخست اعداد تصادفی با تابع چگالی احتمال یکنواخت در فاصله  $a = 0.00$  تا  $b = 1.00$  تولید می‌شود، سپس این عدد به عدد تصادفی جدید با تابع چگالی احتمال یکنواخت در فاصله  $a$  تا  $b$  تبدیل می‌شود. روش گفته شده با رابطه (۴) بیان می‌شود:

$$x_i = a + \left[ \frac{b-a}{1-0} \right] (p_i - 0) \quad [۲] (۴)$$

تابع چگالی احتمال یکنواخت به صورت رابطه (۵) تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} P(x) = \left( \frac{1}{b-a} \right) & a \leq x \leq b \\ P(x) = 0 & \text{other case} \end{cases} \quad [۲] (۵)$$

معادله توزیع احتمال مربوط به تابع چگالی احتمال یکنواخت با انتگرال گیری از معادله (۵)، به صورت معادله (۶) محاسبه می‌شود.

$$\begin{aligned} P(x \leq x_i) &= \int_{x=x_a}^{x=x_f} \left( \frac{1}{b-a} \right) dx \\ &= \left( \frac{x_i}{b-a} \right) - \left( \frac{a}{b-a} \right) \end{aligned} \quad [۲] (۶)$$

بنابراین تابع توزیع احتمال به صورت رابطه (۷) حاصل می‌شود.

$$x_i = a + (b-a)P(x \leq x_i) \quad [۲] (۷)$$

بنابراین عدد تصادفی مورد نظر از رابطه (۷) به دست می‌آید. این روش نشان می‌دهد که در ابتدا ضرورت دارد که از تابع چگالی احتمال انتگرال گرفته شود و تابع توزیع احتمال نظیر تعیین شود. سپس معادله حاصل بر حسب متغیر تصادفی حل می‌شود تا رابطه‌ای نظیر معادله (۷) نتیجه شود. برای تولید عدد تصادفی در فاصله مورد نظر کافی است یک عدد تصادفی در فاصله ۰ تا ۱ تولید و برابر تابع توزیع قرار داده شود. پس از حل رابطه‌ای که مقدار تابع توزیع احتمال را به

در این رابطه  $f(x)$  تابع چگالی احتمال (PDF) یا تابع حالت حدی سیستم مورد نظر و  $g(x)$  تابع زوال است.

برای محاسبه این احتمال روش‌هایی چون روش شبیه‌سازی مونت کارلو، روش‌های تقریبی چون تئوری مرتبه اول قابلیت اعتماد ارائه شدند. قابلیت اعتماد مکمل احتمال زوال است و از رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$R = 1 - P_f \quad [۱] (۲)$$

در تئوری قابلیت اعتماد برای بررسی کمی پارامترها از ضریب تغییرات استفاده می‌شود، این پارامتر برابر نسبت مقدار انحراف استاندارد به مقدار متوسط یک پارامتر می‌باشد [۱].

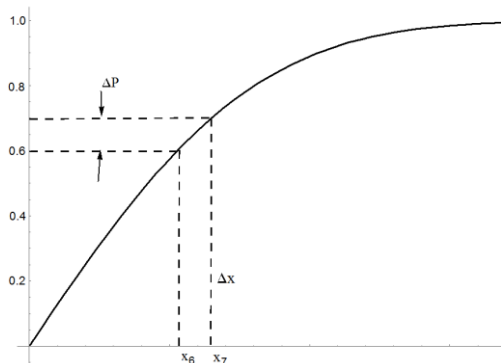
$$COV = \frac{\sigma}{\mu} \quad [۱] (۳)$$

هم‌اکنون آنالیز مونت کارلو قوی‌ترین ابزار مهندسی است که ما را به تحلیل آماری عدم قطعیت‌های موجود در مسائل مهندسی قادر می‌سازد. این روش به خصوص در مسائل پیچیده‌ای که متغیرهای تصادفی بی‌شمار توسط معادلات غیرخطی به یکدیگر مرتبط شده‌اند، بسیار مفید است. آنالیز مونت کارلو را می‌توان مانند آزمایشی تصور نمود که به جای اجرا در آزمایشگاه، توسط کامپیوتر انجام می‌شود. اساس آنالیز مونت کارلو تولید مجموعه‌ای از اعداد تصادفی است. این اعداد تصادفی به طور استاندارد باید طبق یک نوع توزیع خاص تولید شوند. تابع توزیع احتمال یکنواخت و تابع توزیع احتمال نرمال (گاوسین) کاربردی‌ترین توابع توزیع در مدل‌های مهندسی به شمار می‌روند. در ادامه روند تولید متغیرهای ورودی با این نوع توابع ارائه شده است.

اعداد تصادفی متناظر با تابع چگالی احتمال یکنواختی در فاصله  $a = 0.00$  تا  $b = 1.00$  را در نظر بگیرید. اگر کلیه اعداد تصادفی بر ۱۰۰ تقسیم گردند اعداد تصادفی حاصل مستقیماً به اعداد تصادفی یکنواخت در فاصله ۰ تا ۱ تبدیل خواهند شد. در آنالیزهای آماری برای تولید اعداد تصادفی اغلب از اعداد تصادفی یکنواخت در فاصله ۰ تا ۱ استفاده می‌شود.

با توجه به ترسیم تابع توزیع احتمال یکنواخت می توان تابع توزیع تجمعی متناظر با هر تابع چگالی احتمال مشخص را رسم نمود. مرحله دوم عدد تصادفی تولید شده یکنواخت با فاصله  $a = 0.00$  تا  $b = 1.00$  برابر  $p_i$  قرار داده می شود و از  $p_i$  خطی افقی رسم می شود تا منحنی تابع توزیع را در نقطه ای قطع کند. سپس از نقطه تقاطع خطی قائم رسم می شود تا محور  $x$  ها را در نقطه  $x_i$  قطع نماید، این مقدار  $x_i$  معادل با مقدار عدد تصادفی با تابع چگالی احتمال مفروض است.

در یک تابع توزیع تجمعی متناظر با تابع توزیع احتمال نرمال، فرض می شود؛ منحنی نمایش توزیع احتمال به  $m$  فاصله مساوی تقسیم می شود. این فواصل دارای طول  $\Delta p = \frac{1}{m}$  هستند. هر فاصله روی محور احتمال، متناظر با یک فاصله روی محور متغیر تصادفی است.

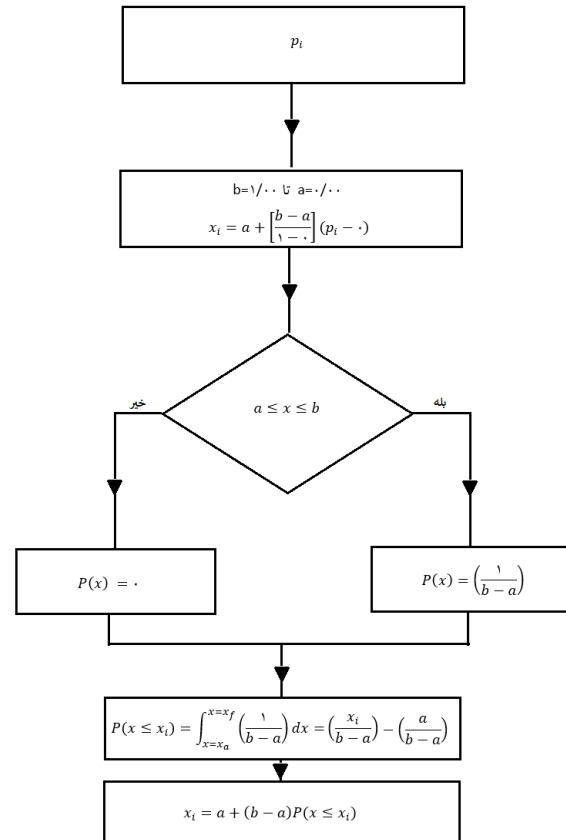


شکل ۲. تابع توزیع تجمعی تابع چگالی احتمال نرمال

شکل ۲ نشان می دهد که محور قائم به  $10$  فاصله تقسیم شده است. حال بایستی به کامپیوتر مقادیر تابع توزیع احتمال در  $m+1$  قطعه متناهی داده شود  $(p_j, x_i; i = 0, 1, \dots, m)$ . همچنین از آنجا که  $m$  تحت کنترل است، مقدار  $m$  به اندازه کافی بزرگ اختیار می شود تا اطمینان حاصل شود که تابع توزیع احتمال به خوبی توسط داده های ورودی تقریب زده خواهد شد.

بنابراین به ازای هر مقدار احتمالی واقع در فاصله ای روی محور قائم، مقدار متغیر تصادفی نظیرش می تواند توسط درون یابی خطی (رابطه (۸)) تعیین شود.

متغیر تصادفی ارتباط می دهد، مقدار عدد تصادفی مورد نظر به دست می آید. در شکل ۱، مراحل تولید اعداد تصادفی با تابع چگالی احتمال یکنواخت در فاصله  $a = 0.00$  تا  $b = 1.00$  نشان داده شده است.



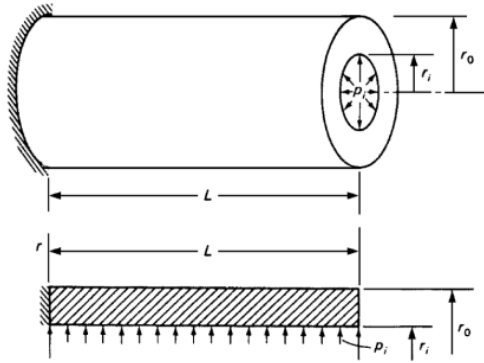
شکل ۱. مراحل تولید اعداد تصادفی با تابع چگالی احتمال یکنواخت

در بخش قبل روش تولید اعداد تصادفی با تابع چگالی احتمال یکنواخت شرح داده شد. اگر آنالیز مونت کارلو تنها برای متغیرهای تصادفی یکنواخت به کار گرفته شود، خیلی محدود شده است؛ بنابراین در این قسمت ملاحظه می شود که چگونه می توان اعداد تصادفی با هر نوع تابع چگالی احتمال تولید کرد. حل این مسئله مستلزم دو مرحله است و مفاهیم آن مشابه مراحل است که در تابع توزیع احتمال یکنواخت توصیف شد.

ابتدا یک عدد تصادفی با تابع چگالی احتمال یکنواخت در فاصله  $a = 0.00$  تا  $b = 1.00$  تولید می شود. در مرحله بعد آن عدد تصادفی به عدد تصادفی جدید متناظر با تابع چگالی احتمال مفروض تبدیل می شود.

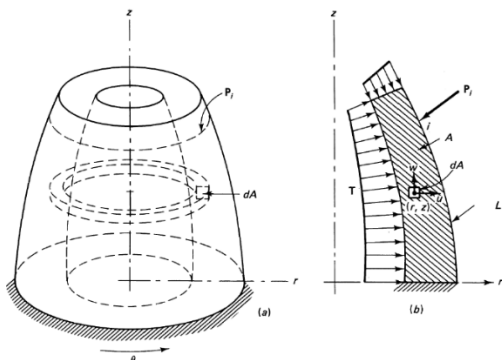
## ۲. مدل سازی

مدل مورد مطالعه در این پژوهش، لوله ای با شعاع داخلی  $r_i$ ، شعاع خارجی  $r_o$  و طول  $L$  است. مشخصات مکانیکی ماده عبارتند از: مدول یانگ  $E$  و ضریب پواسون  $\nu$ . شماتیک از یک لوله در شکل ۳ آمده است.



شکل ۳. نمای شماتیک از لوله

لوله از نظر هندسی یک جسم متقارن محوری است، اگر بارگذاری وارد بر دیواره داخلی لوله را فشار و دما در نظر بگیریم، می توان مدل را به عنوان یک جسم متقارن محوری شبیه سازی کرد. شکل ۳ مین یک مسئله متقارن محوری است. در این شکل  $u$  بردار جابه جایی است که مؤلفه های آن جابه جایی در راستای شعاعی و طولی را در بر می گیرند. بردار  $T$  بیانگر نیروهای گسترده خارجی وارد بر مرز و  $p_i$  معرف نیروی متمرکز است.



شکل ۴. المان مسئله متقارن [۱۰]

بردارهای  $u$ ،  $f$  و  $T$  به صورت رابطه (۹) تعریف می شوند.

$$\begin{aligned} u &= [u, w]^T \\ f &= [f_r, f_z]^T \\ T &= [T_r, T_z]^T \end{aligned} \quad [3] \quad (9)$$

$$x_i = x_j + \left[ \frac{x_{j+1} - x_j}{p_{j+1} - p_j} \right] (p_i - p_j) \quad [2] \quad (8)$$

حال تولید اعداد تصادفی با تابع توزیع احتمال مشخص، توسط تعیین مقدار  $p_i$  با استفاده از تولید اعداد تصادفی یکنواخت در فاصله  $a = 0.00$  تا  $b = 1.00$  انجام می پذیرد، سپس مقدار متغیر تصادفی  $x_i$  با به کارگیری معادله (۸) محاسبه می شود؛ بنابراین مراحل تولید اعداد تصادفی با تابع توزیع احتمال مشخص طبق مراحل زیر است و پس از ایجاد نمونه های تصادفی، تعداد آزمایش های تعیین شده و در هر آزمایش مقادیر متغیرهای ورودی تعیین و آزمایش یا تحلیل انجام گرفته و در ادامه احتمال خرابی برآورد می شود.

- گام ۱: ترسیم تابع توزیع احتمال اعداد تصادفی مورد نظر.
- گام ۲: تقسیم تابع توزیع به  $m$  فاصله.
- گام ۳: قرار دادن حدود  $x_j$  و  $x_{j+1}$  بر روی محور افقی و  $p_j$  و  $p_{j+1}$  بر روی محور قائم برای فواصل انتخابی. این کار به ازای  $j = 0, 1, 2, \dots, m$  انجام می گیرد.
- گام ۴: تولید اعداد تصادفی یکنواخت در فاصله ۰ تا ۱ و شناسایی فاصله ای که این عدد در داخل آن روی محور قائم تابع توزیع احتمال قرار می گیرد.
- گام ۵: برابر قرار دادن  $p_i$  در معادله (۸) با عدد تصادفی حاصل از گام ۴ و محاسبه عدد تصادفی با تابع چگالی احتمال مفروض. در معادله (۸) مقدار عدد تصادفی مورد نظر با  $x_i$  نشان داده شده است.
- گام ۶: تکرار گام های ۴ و ۵ تا وقتی که تعداد اعداد تصادفی مورد نظر محاسبه شوند.

در مبحث ایمنی سازه ها و محاسبه احتمال خرابی یک سیستم، بایستی ابتدا تعریف خرابی مشخص باشد، سپس آنالیز مونت کارلو برای هر تعداد نمونه انجام شود و رخداد خرابی بررسی شود. با تقسیم تعداد نمونه های زوال یافته بر تعداد کل نمونه ها احتمال خرابی حاصل خواهد شد [۱۷].

در رابطه (۱۲)، ماتریس  $D$  ماتریس الاستیک است که به صورت رابطه (۱۳) قابل بیان است.

$$D = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} * \begin{bmatrix} 1 & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & \frac{\nu}{1-\nu} \\ \frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 & \frac{\nu}{1-\nu} \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} & 0 \\ \frac{\nu}{1-\nu} & \frac{\nu}{1-\nu} & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad [3] (13)$$

بردار جابه‌جایی هر المان از ضرب توابع شکل در بردار جابه‌جایی گره‌ها حاصل می‌شود.

$$u = Nq \quad [3] (14)$$

در معادله (۱۴) ماتریس توابع شکل و  $q$  بردار درجات آزادی المان است که هر دو در رابطه (۱۵) مطرح شده‌اند.

$$N = \begin{bmatrix} N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 & 0 \\ 0 & N_1 & 0 & N_2 & 0 & N_3 \end{bmatrix} \quad [3] (15)$$

$$q = [q_1 \quad q_2 \quad q_3 \quad q_4 \quad q_5 \quad q_6]^T$$

برای حل مسئله مقادیر توابع شکل به صورت  $N_1 = N_2 = 1/3$  در نظر گرفته شده‌اند.

بردار کرنش هر المان به صورت رابطه (۱۶) قابل بیان است.

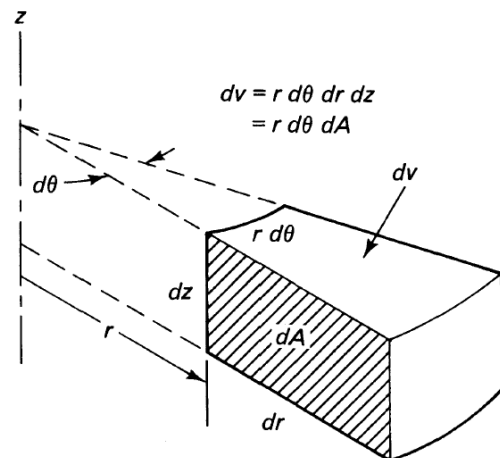
$$\varepsilon = \bar{B}q \quad [3] (16)$$

ماتریس جابه‌جایی-کرنش المان (B) برای المان‌های مثلثی شکل، ماتریسی به ابعاد  $4 \times 6$  بوده و به صورت رابطه (۱۷) تعریف می‌شود [۱۸].

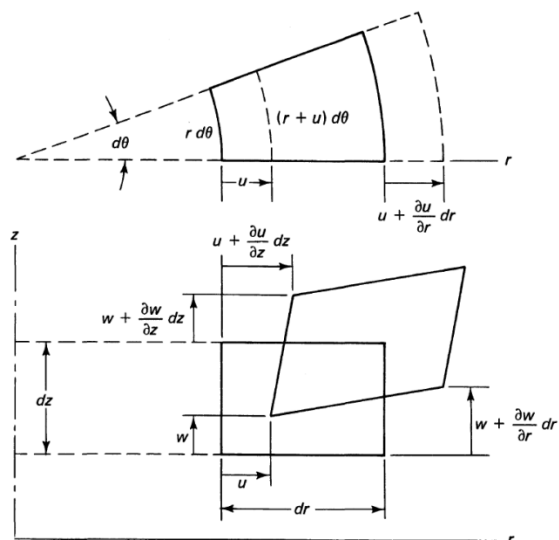
$$\bar{B} = \begin{bmatrix} \frac{z_{23}}{\det J} & 0 & \frac{z_{31}}{\det J} & 0 & \frac{z_{12}}{\det J} & 0 \\ 0 & \frac{r_{32}}{\det J} & 0 & \frac{r_{13}}{\det J} & 0 & \frac{r_{21}}{\det J} \\ \frac{r_{32}}{\det J} & \frac{z_{23}}{\det J} & \frac{r_{13}}{\det J} & \frac{z_{31}}{\det J} & \frac{r_{21}}{\det J} & \frac{z_{12}}{\det J} \\ \frac{N_1}{\bar{r}} & 0 & \frac{N_2}{\bar{r}} & 0 & \frac{N_3}{\bar{r}} & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

در رابطه (۱۷)،  $r_{ij} = r_i - r_j$  و  $z_{ij} = z_i - z_j$ ، (۱۷) و  $\bar{r} = \frac{r_1+r_2+r_3}{3}$  است و به صورت رابطه (۱) مطرح می‌شود.

شکل ۵ یک المان حجمی از جسم متقارن محوری است. در شکل ۶ المان با تغییر شکل ارائه شده است.



شکل ۵. المان حجمی [۱۰]



شکل ۶. المان تغییر شکل یافته [۱۰]

با توجه به شکل ۶ رابطه بین کرنش و جابه‌جایی به صورت رابطه ۱۰ است.

$$\varepsilon = [\varepsilon_r, \varepsilon_z, \gamma_{rz}, \varepsilon_\theta] \quad [3] (10)$$

$$= \left[ \frac{\partial u}{\partial r}, \frac{\partial w}{\partial z}, \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial r} \frac{u}{r} \right]$$

بردار تنش نیز به صورت رابطه (۱۱) تعریف می‌شود.

$$\sigma = [\sigma_r, \sigma_z, \tau_{rz}, \sigma_\theta]^T \quad [3] (11)$$

رابطه بین تنش و کرنش به صورت معمول طبق رابطه هوک بیان می‌شود.

$$\sigma = D\varepsilon \quad [3] (12)$$

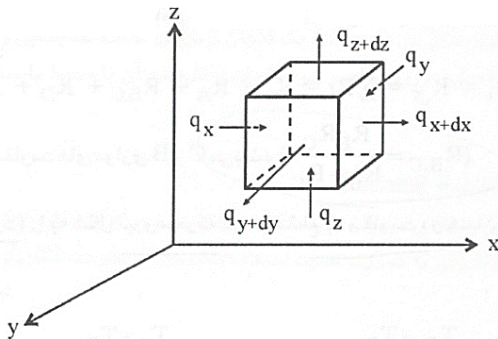
بنابراین حرارت انتقال یافته با استفاده از رابطه (۲۳) قابل محاسبه است.

$$q \equiv A_s \cdot \Delta T \rightarrow q = h \cdot A_s \cdot \Delta T \quad [V] (23)$$

$h$  ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی محیط و  $A$  مساحت سطح انتقال حرارت است. انتقال حرارت جابه‌جایی یک خاصیت مقداری است که تابع جهت نیست.

معادله هدایت حرارتی با در نظر گرفتن المان حجمی شکل ۷، معادله موازنه انرژی به صورت زیر خواهد بود.

نرخ تجمعی = مصرف - تولید + خروجی - ورودی



شکل ۷. موازنه انرژی در المان حجم

لازم به توضیح است که جملات ورودی و خروجی، پدیده‌های سطحی و جملات تولید، مصرف و تجمع پدیده‌های حجمی هستند. در این مسئله نرخ تولید حرارت در واحد حجم برحسب  $\frac{W}{m^3}$  است. همه جمله‌ها در معادله موازنه انرژی برحسب وات هستند. معادله موازنه انرژی و جمله‌های مختلف آن در رابطه (۲۴) آمده است.

$$\text{input: } q_x + q_y + q_z$$

$$\text{output: } q_{x+dx} + q_{y+dy} + q_z$$

$$\text{gen: } \dot{q} \cdot dx dy \cdot dz$$

$$\text{total} = \frac{\partial E}{\partial t} = \frac{\partial(mCT)}{\partial t} = \frac{\partial(\rho VCT)}{\partial t} \quad [V] (24)$$

$$= \frac{\partial(\rho dx dy dz CT)}{\partial t}$$

با توجه به معادله موازنه انرژی و جایگذاری جمله‌های ورودی و خروجی و با فرض ثابت ماندن خواص، معادله موازنه انرژی به صورت رابطه (۲۵) خواهد شد. در این رابطه

$$\alpha = \frac{K}{\rho c}$$

$$\det J = r_{13}z_{23} - r_{23}z_{13} \quad [14] (18)$$

ماتریس سختی نیز برای هر المان از رابطه (۱۹) قابل محاسبه است.

$$k^e = \pi \bar{r} |\det J| \bar{B}^T D \bar{B} \quad [14] (19)$$

از طرفی به راحتی قابل اثبات است که ماتریس جرم نیز برای هر المان از رابطه (۲۰) قابل محاسبه است.

$$M^e = \pi \bar{r} \rho |\det J| N^T D N \quad [14] (20)$$

که  $\rho$  در این رابطه چگالی محسوب می‌شود.

در نهایت ماتریس کلی به صورت زیر به دست می‌آید.

$$M \ddot{u} + K u = F \quad [14] (21)$$

در این مقاله برای یافتن پاسخ قسمت زمانی از روش نیومارک و تفاضل مرکزی استفاده شده است. معادله‌های روش نیومارک به طور کامل در [۱۹] ارائه شده است.

با توجه به تقارن هندسی و تقارن در بارگذاری لوله، برای شبیه‌سازی مسئله از المان متقارن محوری استفاده شده است؛ بنابراین مقطعی از لوله که مستطیل شکل است شبکه‌بندی شده و مورد تحلیل قرار خواهد گرفت. شرایط مرزی مسئله طوری است که در انتهای پایینی (در محل ساپورت) گیردار و در انتهای دیگر اجازه تغییر شکل دارد. کدنویسی مسئله در نرم‌افزار متلب انجام شده و قابلیت اعمال ابعاد هندسی متفاوت را داشته باشد.

از آنجا که لوله حامل سیالی با دمای بالاست انتقال حرارت از سیال به لوله رخ خواهد داد. انتقال حرارت در لوله از قانون فوریه پیروی می‌کند. قانون فوریه در رابطه (۲۲) آمده است.

$$q = -kA \frac{dT}{dX} \quad [V] (22)$$

همچنین انتقال حرارت با محیط اطراف به صورت انتقال حرارت جابه‌جایی خواهد بود. مقدار حرارت انتقال یافته از جسم به محیط متناسب با مساحت جانبی و اختلاف دما است.

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{m+\frac{1}{2},n} \approx \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x}$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{m,n+\frac{1}{2}} \approx \frac{T_{m,n+1} - T_{m,n}}{\Delta y}$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{m-1/2,n} \approx \frac{T_{m,n} - T_{m-1,n}}{\Delta x}$$

$$\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{m,n-1/2} \approx \frac{T_{m,n} - T_{m,n-1}}{\Delta y}$$

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right|_{m,n} \approx \frac{\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{m+\frac{1}{2},n} - \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{m-\frac{1}{2},n}}{\Delta x} \quad [V] \quad (27)$$

$$= \frac{T_{m+1,n} + T_{m-1,n} - 2T_{m,n}}{(\Delta x)^2}$$

$$\left. \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right|_{m,n} \approx \frac{\left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{m,n+1} - \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{m,n-1}}{\Delta y}$$

$$= \frac{T_{m,n+1} + T_{m,n-1} - 2T_{m,n}}{(\Delta y)^2}$$

با قرار دادن مقادیر متناظر برای  $\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$  و  $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$  در معادله لاپلاس، رابطه (۲۸) برای به دست آوردن دمای نقاط داخلی صفحه حاصل خواهد شد و به همین صورت معادله‌های انتقال حرارت برای نقاط مرزی و گوشه و عایق حاصل خواهد شد [۲۰].

$$\frac{T_{m+1,n} + T_{m-1,n} - 2T_{m,n}}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{m,n+1} + T_{m,n-1} - 2T_{m,n}}{(\Delta y)^2} = 0$$

[۲۰] (۲۸)

بعدازاینکه تحلیل انتقال حرارت یک صفحه دوبعدی انجام گیرد، می‌توان از توزیع دمای آن برای تحلیل تنش ناشی از انبساطی که در اثر تغییر دما به وجود آمده استفاده نمود.

در پژوهش حاضر پس از تحلیل انتقال حرارت، توزیع دمای گره‌ها به کار گرفته شده و تغییرات دما ( $\Delta T$ ) و تغییرشکل‌های ناشی از تغییر دما و در نهایت تنش‌های حاصل از آن حاصل خواهد شد.

تغییر درجه حرارت در گره‌ها موجب کرنش حرارتی شده که به صورت رابطه (۲۹) در نظر گرفته می‌شود:

$$\varepsilon_0 = \{\alpha \Delta t, \alpha \Delta t, 0, \alpha \Delta t\}^T \quad [29] \quad [20]$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{K} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad [V] \quad (25)$$

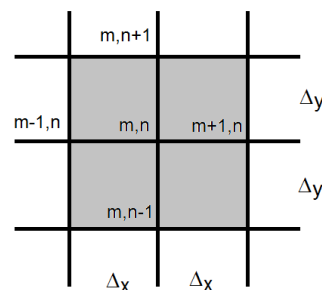
رابطه (۲۵)، در شرایط خاص ساده نیز خواهد شد. در مدل حاضر انتقال حرارتی که در لوله اتفاق می‌افتد به صورت حالت پایدار خواهد بود و از آنجا که مسئله به حالت متقارن محوری ساده‌سازی شده است، می‌توان مسئله را به صورت انتقال حرارت حالت پایدار برای صفحه دوبعدی در نظر گرفت؛ بنابراین معادله هدایت حرارتی به صورت معادله (۲۶) خواهد بود.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \quad [V] \quad (26)$$

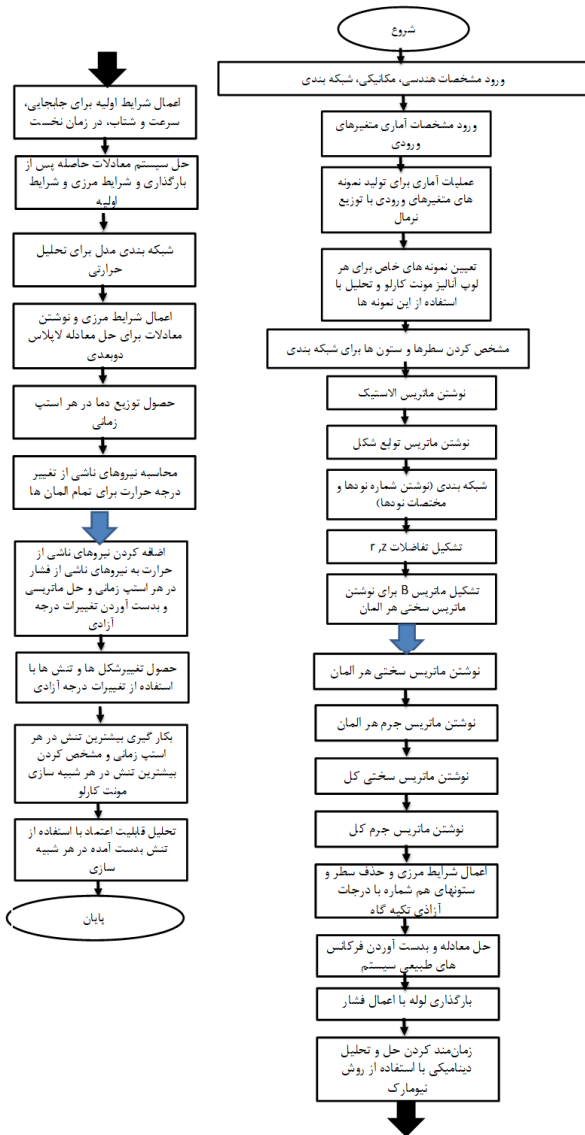
این معادله به معادله دوبعدی لاپلاس معروف است. در این پژوهش از یک روش عددی بر مبنای تفاضل محدود برای حل این معادله استفاده شده است.

در حالت کلی برای مشتق‌های اول و دوم فرمول‌های مختلف عددی موجود است که به روش‌های Forward, Backward و Central معروف‌اند؛ اما در این پژوهش فقط روش حل معادله لاپلاس آورده خواهد شد.

شکل ۸ به عنوان مثالی از یک صفحه دوبعدی است که در جهت x و y به قسمت‌های مساوی تقسیم شده است. نقاط گره در شکل نشان داده شده‌اند. m بیانگر شمارنده n و x بیانگر شمارنده y بوده و هدف به دست آوردن درجه حرارت هر یک از گره‌های داخلی جسم می‌باشد. به هر میزان که نمونه‌های تعریف شده را کوچک‌تر انتخاب کنیم، توزیع درجه حرارت واقعی که تخمین زده می‌شود و پاسخ دقیق‌تر خواهد بود. مشتقات جزئی اول و دوم در راستای x در رابطه (۲۷) آمده است.



شکل ۸. شماره بندی گره در تحلیل حرارتی



شکل ۹. فلوجارت مراحل تحلیل برنامه

### ۳. آنالیز مدل

در این پژوهش تحلیل قابلیت اعتماد لوله حامل سیال داغ پرفشار با استفاده از روش شبیه سازی مونت کارلو که دارای بیشترین دقت در میان روش های تحلیل قابلیت اعتماد می باشد، انجام شده است. برنامه حاضر برای تحلیل قابلیت اعتماد، با توجه به تعداد نمونه که توسط کاربر قابل تعیین است، ابتدا برای هر متغیر ورودی لوله، تعداد نمونه را با توزیع نرمال مشخص می کند و سپس برای هر نمونه تحلیل متغیرهای ورودی خاص را تعیین می کند. در هر نمونه تحلیل تنش لوله در اثر فشار و دما برای بازه های زمانی متوالی انجام می شود و تغییر شکل ها و تنش های حاصل از بارگذاری فشار

رابطه تنش با تغییر شکل نسبی نیز از رابطه (۳۰) قابل محاسبه است.

$$\sigma = D(\varepsilon - \varepsilon_0) \quad [20] \quad (30)$$

$$U = \frac{2\pi}{2} \int (\varepsilon - \varepsilon_0)^T D(\varepsilon - \varepsilon_0) r dA \quad [20] \quad (31)$$

$$= \frac{2\pi}{2} \int_A (\varepsilon^T D \varepsilon - 2\varepsilon^T D \varepsilon_0 + \varepsilon_0^T D \varepsilon_0) r dA$$

در این رابطه  $\varepsilon$  کرنش کلی است. با توجه به روابط (۲۹) و (۳۰)، انرژی کرنشی به صورت رابطه (۳۱) نوشته می شود.

در صورتی که رابطه انرژی کرنشی بسط داده شود، دومین جمله به صورت رابطه (۳۲) خواهد بود:

$$2\pi \int_A \varepsilon^T D \varepsilon_0 r dA = \sum \delta \varepsilon^T (2\pi \bar{r} A_e \bar{B}^T D \bar{\varepsilon}_0) \quad [20] \quad (32)$$

تانسور  $\bar{\varepsilon}_0$  متوسط تغییر شکل های نسبی اولیه در مرکز المان است؛ بنابراین بردار نیروهای ناشی از تغییرات دما دارای شش مؤلفه بوده و به صورت رابطه (۳۳) است.

$$f_t^e = \{f_{t1}, f_{t2}, f_{t3}, f_{t4}, f_{t5}, f_{t6}\}^T \quad [20] \quad (33)$$

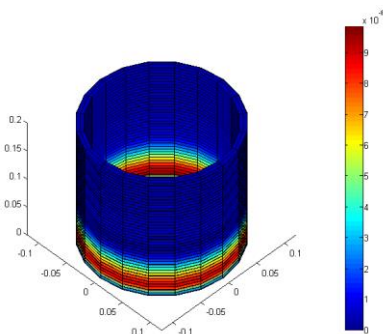
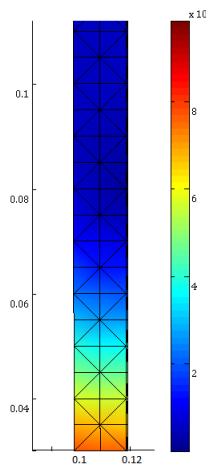
بردار نیروی  $f_t^e$  از رابطه (۳۴) به دست خواهد آمد.

$$\{f_t^e\} = 2\pi \bar{r} A_e \alpha \Delta T B^T D \quad [20] \quad (34)$$

پس از اینکه نیروهای ناشی از تغییر دما حاصل شود، با بردار نیروهای دیگر جمع شده و معادله های حاصله حل خواهد شد [۱۸].

در شکل ۹، فلوجارت مراحل انجام تحلیل های انجام شده در این مقاله، ارائه شده است.

شکل ۱۱ یک نمونه توزیع تنش در جداره لوله را نشان می‌دهد. مقادیر بیشترین تغییر شکل و بیشترین تنش در جدول ۲ آمده است.



شکل ۱۱. توزیع تنش در لوله

جدول ۲. تنش و تغییر شکل در لوله

بیشترین مقدار تغییر شکل	۰/۹۷۳ میلی‌متر
بیشترین مقدار تنش	۳۵/۷۳ مگاپاسکال

همان‌طور که بیان شد قابلیت اعتماد یک سیستم احتمال ماندن آن در  $n$  شبیه‌سازی است. احتمال زوال یک سیستم مکمل قابلیت اعتماد آن است و از رابطه (۳۵) محاسبه می‌شود.

$$P_f = 1 - R \quad (35) [1]$$

در این رابطه  $R$  مقدار قابلیت اعتماد و  $P_f$  احتمال زوال سیستم است.

به منظور حصول اطمینان از برنامه نوشته شده اعتبارسنجی با یک تیر یکسر گیردار که از مرجع [۲۱] انتخاب شده انجام پذیرفته است (شکل ۱۲). مشخصات آماری این تیر در جدول

و دما ذخیره می‌شود. پس از ذخیره تنش‌ها تحلیل قابلیت اعتماد با توجه به بیشترین تنشی که در لوله حادث شده صورت می‌پذیرد. قابلیت اعتماد معرف نسبت تعداد نمونه‌های سالم به تعداد کل نمونه‌های آزمایش است.

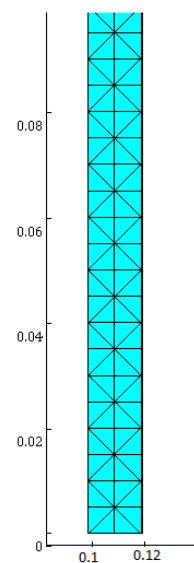
به منظور انجام تحلیل‌ها، قسمتی از لوله‌ای ۸ اینچ با Schedule No 60 که دارای فشار کاری ۵۰ بار و دمای سیال ۸۰ درجه سانتی‌گراد است را در نظر گرفته و تحلیل‌ها برای آن انجام خواهد شد. تکیه‌گاه لوله در یک طرف ثابت در نظر گرفته شده است. مشخصات مکانیکی و هندسی لوله در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱. مشخصات مکانیکی لوله

پارامتر	واحد	مقدار
$L$	m	۱
$r_o$	m	۰/۱۰۹۵۵
$r_i$	m	۰/۰۹۹۲۴
$E$	GPa	۲۰۰
$\theta$	-	۰/۳

#### ۴. ارائه نتایج حاصل از تحلیل

در ادامه نتایج حاصل از تحلیل ارائه خواهد شد. شکل ۱۰ شبکه تولید شده برای جداره لوله را نشان می‌دهد. برای شبکه‌بندی مدل از المان‌های مثلثی استفاده شده است.

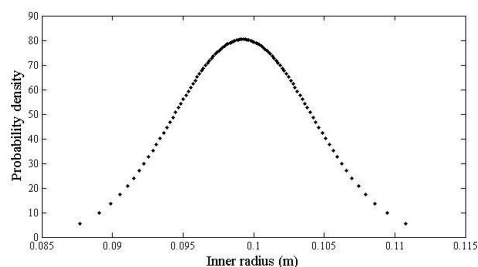
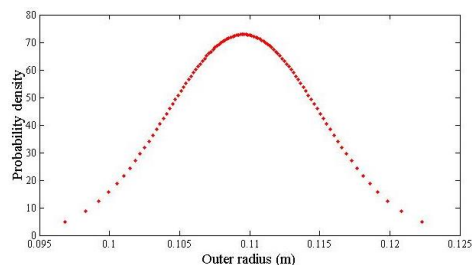
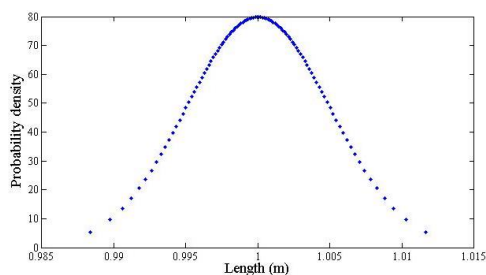


شکل ۱۰. شبکه‌بندی مقطع لوله

مشخصات آماری لوله برای تحلیل قابلیت اعتماد آن در جدول ۵ آمده است. شکل ۱۳ تابع چگالی احتمال متغیرهای ورودی تولید شده توسط برنامه را نمایش می‌دهد. همان‌طور که از نمودار تابع توزیع احتمال نرمال برمی‌آید، تراکم نمونه‌ها در اطراف مقدار متوسط بیشتر است؛ بنابراین احتمال رخداد نمونه‌ها در این محدوده بیشتر است.

جدول ۵. توزیع آماری متغیرهای ورودی لوله

نوع توزیع	COV	انحراف استاندارد	مقدار متوسط
نرمال	۰/۰۰۵	۰/۰۰۵	۱
نرمال	۰/۰۵	۰/۰۵۴۷۷۵	۰/۱۰۹۵۵
نرمال	۰/۰۵	۰/۰۰۴۹۶۲	۰/۰۹۹۲۴



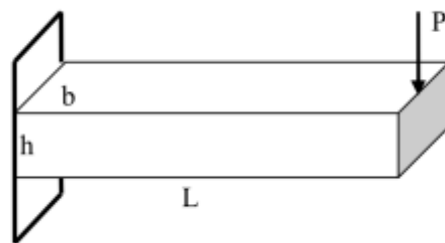
شکل ۱۳. تابع چگالی احتمال متغیرهای ورودی

برنامه حاضر تحلیل قابلیت اعتماد لوله مدل را با تعداد ۱۰۵ نمونه انجام داده که مقدار قابلیت اعتماد و احتمال زوال آن در جدول ۶ آمده است.

۳ آمده است. نیروی وارد به نوک تیر  $P=200N$  است. مدل‌سازی تیر با استفاده از برنامه حاضر انجام شده و قابلیت اعتماد و احتمال زوال آن در جدول ۴ با مرجع [۲۱] مقایسه شده و مقدار بیشترین تنش حاصل از تحلیل با مقدار حاصل از تئوری تنش در انتهای تیر مقایسه گردیده و درصد خطای آن در معادله (۳۶) آمده است. این مقدار خطا در بازه خطای مهندسی قرار دارد و برای تحلیل قابل قبول است. با توجه به این نتیجه برنامه معتبر است و می‌توان از آن برای مدل این پروژه استفاده نمود.

$$\sigma_{\max} = 8437500 Pa$$

$$Error = \frac{8.437 - 8.096}{8.437} \times 100 = 4\% \quad (36)$$



شکل ۱۲. تیر یک سرگیردار [۲۱]

جدول ۳. توزیع آماری متغیرهای ورودی تیر یک سرگیردار

نوع توزیع	انحراف استاندارد	مقدار (متر)	متوسط	متغیر ورودی
نرمال	۰/۰۹	۰/۹		L
نرمال	۰/۰۰۸	۰/۰۸		b
نرمال	۰/۰۰۴	۰/۰۴		h

جدول ۴. احتمال زوال تیر یک سرگیردار با روش شبیه‌سازی مونت کارلو

[۲۱]

بیشترین تنش (مگاپاسکال)	قابلیت اعتماد	احتمال زوال	مرجع [۱۷]
۸/۰۹۶	۰/۹۹۱۶۷	۰/۰۰۸۳۳	مرجع [۱۷]
۸/۴۳۷	۰/۹۷۱۲	۰/۰۲۸۸	برنامه حاضر
-	-	-	تئوری

جدول ۶. قابلیت اعتماد و احتمال زوال لوله

تعداد شبیه‌سازی	احتمال زوال	قابلیت اعتماد
۱۰۵	۰/۰۰۰۵۹	۰/۹۹۹۴۱

کد حاضر با دقت ایجاد اعداد تصادفی با تابع چگالی احتمال یکنواخت تا مقدار  $\frac{1}{100}$  می‌تواند با تعداد ۱۰۵ نمونه شبیه سازی شده، احتمال زوال و قابلیت اعتماد لوله زیر بار ناشی از حرکت گاز داغ و پرفشار درون آن را به ترتیب ۰/۹۹۹۴۱ و ۰/۰۰۰۵۹ پیش‌بینی نماید که با توجه به احتمال زوال پایین لوله و مطابقت با ویژگی‌های آماری گفته‌شده، دارای قابلیت اعتماد بالایی است.

برنامه حاضر انعطاف کافی در تحلیل هر ابعادی از هندسه لوله را داراست. بدیهی است که چنانچه برنامه برای ابعادی با مقیاس کوچک‌تر و تعداد نمونه‌گیری کمتر پاسخگو باشد، توان تحلیل هر بعد و هر تعداد نمونه‌گیری را دارد.

احتمال زوال لوله به معنای نسبت تعداد نمونه‌های زوال یافته به تعداد کل نمونه‌های آزمایشی است. نتایج حاصل از تحلیل قابلیت اعتماد بیانگر سطح بالای قابلیت اعتماد لوله است که این مهم در سیستم پاپینگ بسیار مطلوب می‌باشد.

### سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از اعضاء هیات تحریریه و سردبیر نشریه هیدروفیزیک، بابت حسن همکاری در ارزیابی و انتشار مقاله حاضر، اعلام کنند.

### منابع

- [1] Thoft-Cristensen P, Baker MJ. Structural reliability theory and its applications. Springer Science & Business Media; 2012 Dec 6.
- [2] Blischke WR, Murthy DP. Reliability: modeling, prediction, and optimization. John Wiley & Sons; 2011 Sep 20.
- [3] Gardoni P. Risk and reliability analysis. Springer International Publishing; 2017.
- [4] Kadry S, El Hami A. Numerical methods for reliability and safety assessment. Springer; 2015.
- [5] Grubišić M, Ivošević J, Grubišić A. Reliability analysis of reinforced concrete frame by finite element method with implicit limit state functions. Buildings. 2019 May 10;9(5):119.
- [6] Huang C, Lin K. A method for reliability assessment of aircraft structures subject to

با توجه به احتمال زوال پایین لوله، مدل ساخته‌شده با ویژگی‌های آماری بیان شده، دارای قابلیت اعتماد بالایی است. توجه شود که می‌توان مشخصات آماری (مقادیر متوسط و انحراف استاندارد) را تغییر داده و نتیجه حاصل را بررسی نمود. طبیعی است که هرچه انحراف استاندارد متغیرهای ورودی کمتر باشد قابلیت اعتماد افزایش می‌یابد. کاهش انحراف استاندارد مستلزم افزایش دقت ماشین‌های ساخت است که این امر نیازمند افزایش هزینه‌های ساخت است.

### ۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش با استفاده از کدی که با روش المان محدود و به کمک نرم‌افزار متلب نوشته شد تحلیل تنش دینامیکی و تحلیل قابلیت اعتماد قسمتی از یک سیستم پاپینگ زیر بار فشار و حرارت برای نخستین بار انجام شده است.

برای شبیه‌سازی لوله از خاصیت تقارن محوری استفاده شده و مسئله به حالت دوبعدی ساده گردید. در روند هر تحلیل ابتدا مدل به المان‌های مثلثی تقسیم‌بندی شده، سپس فشار ناشی از سیال به دیواره داخلی وارد می‌شود. سپس در تحلیل انتقال حرارت، دمای نقاط دیواره لوله به دست آمده و تغییر شکل‌ها و به دنبال آن تنش‌های حرارتی به دست می‌آید و در نهایت تنش معادل حاصل می‌شود.

در تحلیل قابلیت اعتماد لوله، متغیرهای ورودی مسئله ابعاد هندسی آن یعنی شعاع داخلی، شعاع خارجی و طول لوله است. برای هر متغیر ورودی مسئله، مقدار میانگین و انحراف استاندارد با توزیع نرمال در نظر گرفته شد، سپس به تولید نمونه‌های آماری هر متغیر با این توزیع پرداخته می‌شود. در ادامه با مشخص بودن تعداد نمونه‌گیری، برای هر نمونه ابعاد هر متغیر تعیین و تحلیل تنش انجام می‌گیرد. سپس بیشترین تنش معادل فون میسز در هر نمونه‌گیری مشخص شده و تحلیل قابلیت اعتماد با توجه به مقادیر تنش انجام می‌گیرد.

- [۱۶] حقیقی مهدی، دنوازعلی، رشوند پوریا، دنواز محمد، ارزیابی آسیب‌پذیری منابع آب زیرزمینی بر اساس شکست خط لوله انتقال سوخت تحت شرایط وقوع زمین‌لرزه با استفاده از روش یادگیری ماشین (ML). مجله پژوهش آب ایران. ۱۴۰۲؛ ۱۸(۱): ۵-۱۵.
- [17] Ditlevsen O, Madsen HO. Structural reliability methods. New York: Wiley; 1996 Jan.
- [19] Abdollahifar A, Nami MR. Determination of dynamic stress intensity factor in FGM plates by MLPG method. Iranian Journal of Science and Technology. Transactions of Mechanical Engineering. 2014 May 1;38(M1+):181.
- [20] Kandlikar S, Garimella S, Li D, Colin S, King MR. Heat transfer and fluid flow in minichannels and microchannels. elsevier; 2005 Nov 18.
- [21] Li J, Wang H, Kim NH. A new moving least square response surface method for structural reliability analysis. In 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA 2012 (p. 1967).
- accidental damage. In 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 2005 Apr 18 (p. 1830).
- [7] Kim WT, Choi MY, Huh YH, Eom SJ. Measurement of thermal stress and prediction of fatigue for STS using Lock-in thermography. Proc. 12th A-PCNDT. 2006.
- [8] Peng LC. Stress analysis methods for underground pipelines. Pipe Line Industry. 1978 May;47(5):65-74.
- [9] Jain S, Agrawal A. Coupled Thermal-Structural Finite Element Analysis for Exhaust Manifold of an Off-Road Vehicle Diesel Engine. International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE). 2013 Sep;3:226-3.
- [10] Bian S, Li W. Calculation of thermal stress and fatigue life of 1000 MW steam turbine rotor. Energy and Power Engineering. 2013 Jun 30;5(4):1484-9.
- [11] Horgan CO, Chan AM. The stress response of functionally graded isotropic linearly elastic rotating disks. Journal of Elasticity. 1999 Jun;55:219-30.
- [12] Chen J, Ding H, Chen W. Three-dimensional analytical solution for a rotating disc of functionally graded materials with transverse isotropy. Archive of Applied Mechanics. 2007 Apr;77:241-51.
- [۱۳] احمدی حمید، بایرامی مهدی، لطف‌اللهی یقین محمدعلی. ارزیابی حساسیت مقاومت استاتیکی اتصالات لوله‌ای K سکوه‌های فراساحلی جکته نسبت به عوامل تصادفی مؤثر بر مبنای تحلیل قابلیت اعتماد. فصلنامه دریا فنون. ۱۳۹۸؛ ۶(۱): ۹۴-۱۰۹.
- [۱۴] افشاری ابراهیم، بنی اسدی احسان، شاکرمی نگار، اطیابی سید علی، اصغری سعید. شبیه‌سازی عددی و تحلیل پارامتری یک لوله حرارتی جهت کاربرد در سامانه‌های هوافضایی. دوفصلنامه دانش و فناوری هوافضا. ۱۳۹۹؛ ۹(۱): ۲۴۷-۲۶۰.
- [۱۵] کوکما معصومه، امامی آزادی محمدرضا، کاردان نازیلا. ارزیابی لرزه‌ای خط لوله گاز فرا ساحل در ساحل خلیج فارس و تحلیل قابلیت اعتماد آن با لحاظ نمودن اندرکنش خاک و لوله. نشریه مهندسی سازه و ساخت. ۱۴۰۳؛ ۱۱(۹): ۵-۲۶.