

ارزیابی قابلیت اطمینان وابسته به زمان خط لوله انتقال گاز طبیعی 48'' واقع در جنوب کشور

سیامک پارسایی^۱، احمد پیروزمند^{۲*}، محسن ابراهیمیان^۳، و فاطمه محمد حسینی^۴

- ۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، s.parsaei@shirazu.ac.ir
- ۲- دانشیار، رئیس مرکز تحقیقات ایمنی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، pirouzm@shirazu.ac.ir
- ۳- دانش آموخته دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، mhsn69@gmail.com
- ۴- دانش آموخته دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، mohammadhasani@shirazu.ac.ir

چکیده

ارزیابی قابلیت اطمینان زمانی خطوط انتقال گاز طبیعی از ملزومات بهره برداری ایمن، پایدار و بهینه می باشد. این ارزیابی پیش بینی کننده وضعیت یکپارچگی خط لوله و در نتیجه منجر به صرفه جویی در هزینه بازرسی، تعمیر و نگهداری می گردد. در این پژوهش قابلیت اطمینان وابسته به زمان خط لوله انتقال گاز 48 اینچی واقع در جنوب کشور مورد ارزیابی قرار می گیرد. برای این منظور نقص های خوردگی به عنوان مهمترین عامل تهدید کننده یکپارچگی خط لوله انتخاب و مدل های آماری تولید و رشد عمقی و طولی نقص های خوردگی در طول خط لوله با در نظر گرفتن همبستگی موجود بین ابعاد رشد، بر اساس داده های بازرسی توپک رانی هوشمند خط لوله توسعه می یابد. با قسمت بندی خط لوله تخمین آماری پارامترهای مدل های تولید و رشد نقص های خوردگی با استفاده از استنباط بیژین و تکنیک MCMC برای هر قسمت خط لوله ارزیابی می شوند. به منظور در نظر گرفتن همبستگی بین مدهای خرابی نشت کوچک و ترکیدگی، احتمالات خرابی توسط روش PHI3، مبتنی بر روش FORM، مورد ارزیابی قرار می گیرند. نتایج حاصل از مدل های احتمالاتی توسعه داده شده نشان می دهد که این مدل ها قادر به پیش بینی قابل قبول تعداد نقص جدید تولیدی و همچنین رشد طولی و عمقی نقص ها در هر قسمت از خط لوله با گذشت زمان می باشند. نتایج مربوط به ارزیابی احتمالات شکست وابسته به زمان نشان می دهد که مد خرابی ترکیدگی با احتمال بیشتری منجر به خرابی خط لوله می گردد.

واژه های کلیدی: تولید و رشد نواقص خوردگی، همبستگی آماری، MCMC، PHI3، FORM

مقدمه

به دلیل اینکه فرآیند خوردگی و اطلاعات گزارش شده توسط ابزارهای بازرسی درون خطی (ILI) به شدت تحت تأثیر عدم قطعیت ها هستند، بسیاری از محققان برنامه مدیریت خوردگی مبتنی بر قابلیت اطمینان را به منظور توسعه استراتژی های مدیریت موثر برای بهره برداری، نگهداری و بازسازی خطوط لوله اتخاذ کرده اند [۳-۵].

یک مؤلفه مهم در مدیریت یکپارچگی مبتنی بر قابلیت اطمینان خطوط لوله خوردگی، مدل سازی تولید و رشد عیوب خوردگی در طول زمان است. ایجاد و رشد عیوب خوردگی در سطح خارجی خط لوله مدفون در خاک، با بکارگیری مدل های احتمالی پیش بینی می شوند که این مدل ها بر اساس داده های بازرسی میدانی، مانند تعداد عیوب و

لوله های فولادی در طول عمر مفید خود در معرض خطرات احتمالی متعددی قرار دارند و هنگامی که یک تهدید دینامیکی مانند خوردگی وجود داشته باشد، یکپارچگی خطوط لوله در معرض خطر می باشد. رشد عیوب خوردگی خارجی بر روی خطوط لوله مدفون در خاک یک پدیده مخرب پویا و پیچیده است که تحت تأثیر عوامل زیادی مانند خواص فیزیکی و مکانیکی خط لوله و محیط احاطه کننده اطراف خط لوله قرار دارد [۱، ۲].

درست نمایی (likelihood) در به روز رسانی بیزی با روش iTMCMC جای داده می شود. سپس، احتمال شکست وابسته به زمان بخش مورد نظر از خط لوله ناشی از حالت‌های شکست نشت کوچک و ترکیدگی به صورت یک سیستم سری ارزیابی می‌شود. احتمال شکست در هر عیب خوردگی توسط یک روش مبتنی بر FORM، یعنی PHI3، ارزیابی می‌شود، بطوریکه این روش همبستگی بین توابع حالت حدی نشت کوچک و ترکیدگی را در نظر می‌گیرد.

روش انجام پژوهش

مدل احتمالاتی رشد عیوب خوردگی

در این مطالعه رشد ابعاد عمق و طول نقص خوردگی در طول زمان توسط مدل احتمالاتی قانون توانی توصیف شده است. بطوریکه این مدل تابعی از مدت زمان سپری شده از زمان شروع خوردگی (t_0) می‌باشد و به صورت رابطه (۱) نمایش داده می‌شود:

$$Y_m(t, \theta_m) = \theta_{1,m}(t - t_{0,m})^{\theta_{2,m}} + \sigma_m \varepsilon_m \quad (1)$$

بطوریکه m نشان دهنده نوع کمیت عیب خوردگی، به عنوان مثال $m = d$ برای عمق نقص و $m = l$ برای طول نقص، Y_m بیانگر مقدار کمی اندازه نقص در یک زمان مشخص، به عنوان مثال بیشینه عمق نقص یا طول نقص در زمان t ، ε_m نشان دهنده متغیر تصادفی با میانگین صفر و انحراف معیار واحد به عنوان خطای مدل، σ_m انحراف معیار خطای مدل را نشان می‌دهد و در نهایت $\Theta_m = (\theta_{1,m}, \theta_{2,m}, t_{0,m}, \sigma_m)$ برداری شامل پارامترهای مجهول مدل قانون توانی زمان می‌باشد [۲، ۱۰، ۱۲].

هنگامی که رابطه قانون توانی زمان به عنوان مدل احتمالاتی رشد نقص در نظر گرفته می‌شود باید زمان شروع خوردگی را تخمین زد. در این پژوهش ماهیت تصادفی برای زمان وقوع نقص‌های خوردگی در نظر گرفته شده است. بنابراین با این فرض که نقص با ابعاد شناسایی شده بزرگ‌تر زودتر رخ می‌دهد، زمان شروع هر نقص به صورت منحصر به آن نقص در نظر گرفته می‌شود و این زمان تصادفی از یک توزیع گاما پیروی می‌کند. با در نظر گرفتن زمان شروع نقص‌ها به صورت یک فرآیند تصادفی، مدل‌های پیش‌بینی‌کننده می‌توانند نقص‌های جدید ایجاد شده در آینده، بعد از آخرین بازرسی، را نیز پیش‌بینی کنند. با توجه به این فرض که در یک قسمت از خط لوله، نقص (از نظر طول یا عمق) با مقدار شناسایی بزرگ‌تر زودتر رخ می‌دهد، به هر نقص یک عدد رتبه بندی $j, 2, \dots, 1, j=1$ ، به عنوان ترتیب شکل گیری نقص اختصاص داده می‌شود و نقص با بزرگترین اندازه ابعاد دارای $j=1$ است. به این ترتیب زمان شروع خوردگی، $t_{0,m}$ ، برای یک نقص، از تابع توزیع گاما با پارامتر شکل j و پارامتر مقیاس، λ_m ، پیروی می‌کند، که نرخ ایجاد نقص‌ها می‌باشد و همچنان یک پارامتر مجهول است.

عمق و طول محوری آنها که عموماً با استفاده از ابزارهای ILI مانند فناوری اولتراسونیک (UT) یا نشت شار مغناطیسی (MFL) حاصل می‌شوند، توسعه می‌یابند.

با توجه به ماهیت غیر قطعی زمان و مکان شروع عیوب خوردگی و همچنین رشد آنها، مدل‌های احتمالاتی مختلفی برای توصیف چنین رفتارهای غیر قطعی به کار گرفته شده است. در مدل‌سازی شکل گیری تصادفی عیوب خوردگی، مدل‌های مبتنی بر فرآیند تصادفی، مانند فرآیندهای پواسون همگن و غیر همگن (HPP, NHPP) در بازه‌های زمان مشخص بکار گرفته شده اند [۶، ۷]. مدل‌های احتمالاتی متنوعی مانند تابع خطی و قانون توانی زمان، زنجیره مارکوف، فرآیند گاما و فرآیند گاوسی معکوس، به منظور ارزیابی اندازه‌های ابعاد عیوب خوردگی در طول زمان استفاده شده است [۲، ۶، ۸، ۹]. با توجه به عدم وجود محدودیت‌هایی مانند نرخ ثابت رشد در طول زمان و همچنین شناسایی عیوب همسان، یعنی عیوب مشخص شده در مکان‌های معین حداقل در دو بازرسی متوالی، تابع قانون توانی زمان برای مدل کردن رشد عیوب خوردگی به طور گسترده‌ای توسط بسیاری از محققان پذیرفته شده است [2، 10-12].

به منظور کمی کردن عدم قطعیت‌های مربوط به پارامترهای مدل‌های احتمالاتی، بسیاری از محققان روش بیزی را از طریق تکنیک‌های شبیه‌سازی زنجیره مارکوف مونت کارلو (MCMC) در استنباط داده‌ها ILI بکار گرفته اند [۱۳-۱۵]. همچنین مجموعه اصلاحات در روش MCMC برای بهبود مسائل مرتبط با آن، مانند نمونه‌های وابسته، مقداردهی اولیه یک دانه (seed)، و محدودیت در تعداد پارامترهای غیر قطعی ارائه شده است. روش iTMCMC بهبود یافته روش MCMC می‌باشد و برای کاهش مشکلات فوق روش توسعه یافته است [۱۶].

برای ارزیابی احتمالات شکست وابسته به زمان خطوط لوله تحت فشار شامل گروهی از عیوب خوردگی خارجی روش قابلیت اطمینان مرتبه اول (FORM) در دو رویکرد مختلف موجود، شامل بخش مشخصی از خط لوله و عیوب مشخصی بر روی خط لوله، به طور گسترده بکار گرفته شده است [۲، ۱۷، ۱۸].

به طور کلی در مطالعات قبلی همبستگی‌های موجود، شامل همبستگی اندازه طولی و عمقی عیوب خوردگی و همبستگی انواع خرابی‌ها در عیوب مختلف، به صورت همزمان نادیده گرفته شده اند. هدف اصلی این مقاله، مطالعه همبستگی‌های ذکر شده به صورت همزمان در ارزیابی قابلیت اطمینان قسمتی از خط لوله ۴۸ اینچی انتقال گاز طبیعی واقع شده در جنوب کشور می‌باشد. برای این منظور ابتدا، مدل احتمالاتی غیرخطی پیش‌بینی رشد طولی و عمقی عیب خوردگی فعال در طول زمان، یعنی مدل قانون توانی زمان، در بخش مورد نظر از خط لوله بکار گرفته می‌شود. همبستگی بین رشد طولی و عمقی عیوب خوردگی از طریق یک تابع توزیع نرمال دو متغیره به عنوان تابع

مدل احتمالاتی ایجاد نواقص خوردگی

ایجاد نواقص در هر قسمت از خط لوله براساس یک فرآیند پواسون همگن (HPP) شامل پارامتر نرخ λ ، به عنوان پارامتر مجهول مدل، در نظر گرفته می شود. HPP پیش بینی شکل گیری نقص های جدید، پس از آخرین بازرسی را ممکن می سازد. با در نظر گرفتن تابع جرم احتمال توزیع پواسون، احتمال تولید تعداد نقص های جدید در یک قسمت از لوله را می توان به صورت رابطه (۲) نوشت:

$$P_{N_d}(n_d) = \frac{e^{-\lambda\tau}(\lambda\tau)^{n_d}}{n_d!} \quad (2)$$

بطوریکه n_d بیانگر تعداد نقص های گزارش شده در ILI برای یک قسمت از لوله، τ نشان دهنده زمان سپری شده از آخرین بازرسی و λ پارامتر نرخ وقوع نقص ها است. بر این اساس بردار شامل تمام پارامترهای مجهول موجود در مدل های احتمالاتی رشد عمقی و طولی را می توان به صورت $\Theta_m = (\theta_{1,m}, \theta_{2,m}, \lambda_m, \sigma_m)$ بازنویسی کرد.

به روز رسانی بیژین برای تعیین پارامترهای مجهول مدل های احتمالاتی ایجاد و رشد نواقص خوردگی

پارامترهای مجهول مدل های رشد عمقی و طولی نقص و همچنین پارامتر نرخ وقوع HPP با استفاده از رویکرد آماری استنباط یا به روزرسانی بیژین به همراه داده های ILI گزارش شده از بازرسی ها استفاده شده است. اگر \mathbf{X} نشان دهنده بردار داده های بازرسی باشد، توزیع مشترک پیشین Θ ، $f(\Theta)$ را می توان با استفاده از قضیه بیژ با تابع درست نمایی $L(\mathbf{X}|\Theta)$ ترکیب کرد و توزیع مشترک پسین Θ ، $f'(\Theta|\mathbf{X})$ ، را به دست آورد. این فرآیند در رابطه (۳) نمایش داده شده است.

$$f'(\Theta|\mathbf{X}) = \frac{L(\mathbf{X}|\Theta)}{\int L(\mathbf{X}|\Theta)f(\Theta)d\Theta} f(\Theta) \quad (3)$$

بطوریکه $L(\mathbf{X}|\Theta)$ نشان دهنده اطلاعات عینی مربوط به Θ موجود در \mathbf{X} و $f(\Theta)$ نشان دهنده وضعیت به روز شده دانش در مورد Θ (پارامترهای مدل) می باشد.

توزیع پیشین بیانگر باور اولیه در مورد پارامترهای مجهول مدل بدون در نظر گرفتن اطلاعات ضمنی موجود در داده های مشاهده شده می باشد و معمولاً براساس اطلاعات به دست آمده از تجربیات، مطالعات قبلی و یا نظرات متخصصان مربوطه مشخص می شود. توزیع پیشین مربوط به پارامتر مجهول مدل HPP، یعنی نرخ وقوع λ ، به صورت توزیع گاما در نظر گرفته می شود. بطوریکه این توزیع تضمین می کند که این پارامتر مثبت می باشد و می تواند به راحتی به عنوان توزیع بدون اطلاعات ساخته شود. به منظور برآورده ساختن الزامات موجود بر روی پارامترهای مدل رشد، به عنوان مثال پارامترهای مجهول نشان داده شده در بردار Θ_m نمی توانند منفی باشند، توزیع های نرمال یا گاوسی

به عنوان توزیع پیشین سایر پارامترهای مجهول مدل های رشد انتخاب می شود. انتخاب توزیع های گاما و گاوسی به عنوان توزیع پیشین پارامترهای مجهول مدل، به توزیع پسین مزدوجی منجر می گردد که هزینه محاسباتی در فرآیند به روزرسانی را به طور قابل توجهی را بهبود می بخشد.

تابع درست نمایی اطلاعات جدید موجود در داده های مشاهده شده (داده های توپک رانی هوشمند) را از طریق تئوری بیژین به فرآیند به روز رسانی وارد می کند. در استنباط بیژین مربوط به تعداد نواقص شکل گرفته بر روی خط لوله، تابع درست نمایی برابر با تابع توزیع HPP، رابطه ۲، می باشد. تابع HPP اطلاعات مربوط به تعداد نواقص شکل گرفته در هر قسمت از خط لوله را و مدت زمان سپری شده از دفن خط لوله تا زمان بازرسی های مجزا را به استنباط بیژین وارد می کند. با توجه به همبستگی آماری که بین داده های رشد طولی و عمقی نواقص موجود بر روی خط لوله وجود دارد، برای انتقال اطلاعات موجود در داده های توپک رانی مربوط به اندازه ابعاد نواقص، از طریق استنباط بیژین، به توزیع پارامترهای مدل های احتمالاتی رشد طولی و عمقی نواقص لازم است تا از تابع درست نمایی استفاده شود که همبستگی آماری بین داده های حاصل از توپک رانی را نیز در بر گیرد. از این رو، با در نظر گرفتن تابع توزیع احتمال حاشیه ای نرمال برای بیشینه عمق و طول یک نقص، توزیع مشترک آن نقص به صورت یک توزیع نرمال دو متغیره تشکیل می شود و این توزیع نرمال دو متغیره به عنوان تابع درست نمایی در استنباط بیژین مربوط به تعیین پارامترهای مدل های رشد طولی و عمقی بکار گرفته می شود. با این فرض که در بازرسی k ام، تعداد i نقص شناسایی شده است. اگر $X_d = (X_{d1}, X_{d2}, \dots, X_{di})$ و $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{ii})$ به ترتیب بیانگر بردارهای عمق و طول گزارش شده در بازرسی k ام در هر قسمت مشخص از خط لوله باشند، تابع درست نمایی رشد همزمان طولی و عمقی تمامی نواقص موجود در یک قسمت از خط لوله با حاصل ضرب توزیع نرمال دو متغیره مربوط به تمامی نواقص تعریف می شود. بنابراین تابع درست نمایی \mathbf{X} به شرط Θ برای N_d نقص مشخص شده در بازرسی k ام را می توان به صورت رابطه (۴) نمایش داد:

$$L(\mathbf{X}|\Theta) = \frac{1}{\prod_{i=1}^{N_d} 2\pi\sigma_d\sigma_l\sqrt{1-\rho^2}} \exp \left(-\frac{1}{2(1-\rho^2)} \sum_{i=1}^{N_d} \left[\frac{(Y_{d,i} - \hat{Y}_{d,i})^2}{\sigma_d^2} - \frac{2\rho(Y_{d,i} - \hat{Y}_{d,i})(Y_{l,i} - \hat{Y}_{l,i}) + (Y_{l,i} - \hat{Y}_{l,i})^2}{\sigma_d\sigma_l} \right] \right) \quad (4)$$

پارامترهای $\hat{Y}_{d,i}$ و $\hat{Y}_{l,i}$ نشان دهنده تخمین نقطه ای مدل تابع توانی زمان از طول و عمق نواقص، $Y_{d,i}$ و $Y_{l,i}$ بیانگر مقادیر طول و عمق گزارش شده از داده های بازرسی و پارامترهای σ_d و σ_l انحراف معیار

یک نقص خوردگی بر روی خط لوله را می توان به صورت رابطه (۶) نشان داد.

$$P_f^{(B)}(t) = P[C_P(t) - D_P \leq 0] \quad (6)$$

بطوریکه C_P بیانگر ظرفیت فشار ترکیدگی و تابعی از اندازه ابعاد نقص می باشد که با استفاده از $C_P = e_{cp} P_u$ تعیین می گردد. بطوریکه e_{cp} خطای مدل ظرفیت فشار ترکیدگی و P_u را می توان براساس ASME B31G اصلاح شده ارزیابی و به صورت رابطه (۷) بیان کرد [۱۹]:

$$P_u(t) = \frac{2d_w(\sigma_{\min,y} + 68.95)}{d_0} \left[\frac{1 - \frac{0.85d(t)}{d_w}}{1 - \frac{0.85d(t)}{F d_w}} \right] \quad (7)$$

که در آن F بیانگر فاکتور Folias و به صورت رابطه (۸) تعریف می شود:

$$F = \begin{cases} \sqrt{1 + 0.6275 \frac{I^2(t)}{d_0 d_w} - 0.003375 \frac{I^4(t)}{(d_0 d_w)^2}} & \frac{I^2(t)}{d_0 d_w} \leq 50 \\ 3.3 + 0.032 \frac{I^2(t)}{d_0 d_w} & \frac{I^2(t)}{d_0 d_w} > 50 \end{cases} \quad (8)$$

بطوریکه d_0 بیانگر قطر خارجی لوله، $\sigma_{\min,y}$ و $\sigma_{\min,y} + 68.95$ (MPa) به ترتیب نشان دهنده تنش تسلیم و تنش جریانی (Flow stress) تعریف شده به طور تجربی برای لوله فولادی و l طول نقص را نشان می دهد.

ارزیابی احتمال شکست هر نقص خوردگی

بعد از تعیین حالات شکست خط لوله احتمال خرابی مربوط به هر نقص بر روی خط لوله براساس روش قابلیت اطمینان مرتبه اول (FORM) مورد ارزیابی قرار می گیرد. احتمال خرابی به صورت احتمال مشروط رسیدن یا گذشتن از یک حد مجاز تعریف شده در استانداردها در حضور مجموعه ای از متغیرهای تصادفی تعریف می شود. احتمال خرابی در روش FORM به صورت زیر تعریف می شود:

$$P_f \approx \Phi(-\beta) \quad (9)$$

بطوریکه Φ تابع توزیع تجمعی در فضای استاندارد نرمال و β شاخص قابلیت اطمینان می باشد. به منظور تعیین شاخص قابلیت اطمینان ابتدا متغیرهای تصادفی وابسته و دارای توزیع غیرنرمال از طریق تبدیل NATAF وارد فضای نرمال استاندارد می گردند. سپس روش FORM الگوریتم جستجوی HL-RF را بکار می گیرد تا شاخص قابلیت اعتماد در فضای نرمال استاندارد ارزیابی گردد. با قرار گرفتن شاخص قابلیت اعتماد در تابع توزیع تجمعی نرمال استاندارد احتمال شکست محاسبه می گردد.

همبستگی بین اندازه های طولی و عمقی یک نقص می تواند منجر به همبستگی خرابی های موجود در آن نقص شود. به منظور اجرای یک

مربوط به داده های طول و عمق نواقص حاصل از داده های بازرسی هستند.

تکنیک نمونه برداری زنجیره مارکوف مونت کارلو

تکنیک زنجیره مارکوف مونت کارلو، MCMC، به عنوان یک تکنیک مبتنی بر نمونه برداری برای ارزیابی توزیع مشترک پسین $(f(\Theta))$ ، توزیع های پارامترهای مجهول مدل Θ ، می باشد که برای جلوگیری از محاسبه ضریب نرمال ساز، مخرج رابطه (۳) و در نتیجه کاهش حجم محاسبات مورد استفاده قرار می گیرد. به منظور کاهش مسائل مربوط به روش MCMC در فرایند به روز رسانی توزیع مشترک پسین، مانند محدودیت در تعداد پارامترهای غیر قطعی و وابستگی نمونه های، در این پژوهش روش بهبود یافته MCMC، بکار گرفته شده است. روش بهبود یافته MCMC به منظور ارزیابی عددی توزیع های حاشیه ای پسین پارامترهای مدل های احتمالاتی، در زبان برنامه نویسی پایتون کد نویسی شده است.

ارزیابی قابلیت اطمینان

برای ارزیابی عملکرد یک خط لوله دارای نواقص خوردگی، احتمال شکست با استفاده از تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان محاسبه می شود. احتمال شکست به صورت احتمال شرطی رسیدن یا عبور از حدود مجاز (Limit state) تعیین شده با توجه به مجموعه ای از متغیرهای مسئله تعریف می شود.

مدهای خرابی

یک خط لوله تحت فشار دارای نواقص خوردگی مختلف ممکن است به دلیل دو نوع خرابی متمایز، یعنی نشستی کوچک و ترکیدگی، از کار بیفتد. بنابراین، در این پژوهش دو حالت خرابی نشستی کوچک و ترکیدگی در نظر گرفته شده است.

فرمول مربوط به احتمال شکست وابسته به زمان، $P_f^{(K)}$ ، که در آن k حالت شکست است، در ادامه توضیح داده شده است. حالت شکست نشستی کوچک به شرایطی اشاره دارد که یک عیب خوردگی به ضخامت دیواره لوله نفوذ می کند و احتمال شکست مربوط به این حالت خرابی را می توان به صورت رابطه (۵) بیان کرد.

$$P_f^{(L)}(t) = P[d_w - d(t) \leq 0] \quad (5)$$

بطوریکه d_w بیانگر ضخامت خط لوله و $d(t)$ بیانگر بیشینه عمق یک نقص خوردگی در زمان t می باشد که از طریق رابطه (۱) تعیین می شود. حالت شکست ترکیدگی به یک فروپاشی پلاستیک تحت فشار داخلی اشاره دارد و زمانی اتفاق می افتد که فشار عملیاتی از ظرفیت فشار خط لوله دارای نقص خوردگی بیشتر شود. احتمال رویداد ترکیدگی برای

در این رابطه Φ_2 تابع توزیع تجمعی نرمال دوجمله‌ای می باشد. در حالت که خرابی خطوط لوله توسط دو تابع حالت حدی نشت کوچک و ترکیبگی بیان می شود، احتمال شرطی در هر دو تابع حالت حدی وجود دارد، طبق تئوری بالا از یک تابع توزیع تجمعی نرمال استاندارد مرتبه سوم PHI3 ، رابطه (۱۳)، به منظور ارزیابی احتمال خرابی سیستم در طول زمان برای هر نقص خوردگی استفاده می شود.

$$\Phi_3([\beta^{\text{se}}(\tau), -\beta^{\text{se}}(\tau+\Delta t), \beta^{\text{bc}}(\tau)]^T), \mathbf{R}^{\text{sb}}(\tau, \Delta t) \quad (13)$$

بنابراین پارامترهای $P_f^{(L)}(t)$ و $P_f^{(B)}(t)$ برای هر نقص خوردگی در طول زمان به صورت زیر و به طور افزایشی مورد ارزیابی قرار می گیرند.

$$P_f^{(L)}(\tau+\Delta t) = P_f^{(L)}(\tau) + \Delta P_f^{(L)}(\tau, \Delta t) \quad (14)$$

$$P_f^{(B)}(\tau + \Delta t) = P_f^{(B)}(\tau) + \Delta P_f^{(B)}(\tau, \Delta t) \quad (15)$$

که در آن $\Delta P_f^{(L)}(\tau, \Delta t)$ و $\Delta P_f^{(B)}(\tau, \Delta t)$ (با در نظر گرفتن $(0 \leq \tau < t)$)، به ترتیب احتمالات رو به رشد نشت کوچک و ترکیبگی در بازه زمانی کوتاه بین τ و $\tau+\Delta t$ هستند و براساس تابع توزیع تجمعی PHI3 ارزیابی می گردند. با در نظر داشتن این نکته که رشد خوردگی خطوط لوله به طور معمول فرآیندی کند است مقدار Δt در بازه یک سال بررسی می گردد که انتخاب معقولی برای تحلیل قابلیت اطمینان خطوط لوله دارای خوردگی می باشد.

بعد از تعیین احتمال شکست هر عیب خوردگی در طول زمان با روش PHI3 ، به منظور ارزیابی احتمال شکست سیستم مربوط به خط لوله شامل تعداد زیادی عیب خوردگی فعال، ابتدا خط لوله به تعداد محدودی بخش تقسیم می شود. به منظور ارزیابی احتمال شکست هر بخش از خط لوله باید نقص های شناسایی شده از فرآیند ILI و نقص های جدید تولید شده بعد از آخرین بازرسی مورد بررسی قرار گیرند. هر بخش از خط لوله به طور خاص به صورت یک سیستم سری متشکل از نقص های شناسایی شده در بازرسی و همچنین نقص های جدید تولید شده بعد از اجرای بازرسی در نظر گرفته می شود و روی دادن هر مد خرابی در هر نقص در یک بخش، نشان دهنده خرابی کل بخش می باشد. بنابراین احتمال خرابی بخش k م برای حالت خرابی k ام به صورت رابطه (۱۶) ارزیابی می گردد:

$$P_{f,i}^{(k)}(t) = 1 - \left(1 - P_{f,i}^{(k),\text{new}}(t)\right) \prod_{j=1}^{M_{d,i}} [1 - P_{f,ij}^{(k)}(t)] \quad (16)$$

که در آن $P_{f,ij}^{(k)}(t)$ احتمال خرابی نقص شناخته شده k م در بخش i ام برای حالت خرابی k م را نشان می دهد. $M_{d,i}$ نیز بیانگر تعداد نقص های شناسایی شده در بخش i ام و $P_{f,i}^{(k),\text{new}}(t)$ احتمال خرابی سیستم متشکل از نقص های جدید تولید شده در بخش i ام و برای

ارزیابی واقع بینانه از احتمال شکست چنین وابستگی باید مورد بررسی قرار گیرد. خرابی نشت کوچک و ترکیبگی متقابلاً با یکدیگر رقابت می کنند. وقوع یک حالت خرابی، نشت کوچک یا ترکیبگی، احتمال وقوع دیگری را بین می برد. به منظور در نظر گرفتن همبستگی های بالقوه بین حالات خرابی مختلف در یک نقص یک روش مبتنی بر FORM به منظور ارزیابی احتمالات وابسته به زمان خرابی های نشت کوچک و ترکیبگی در نظر گرفته شده است.

اگر $P_b(t)$ و $P_s(t)$ به ترتیب به عنوان احتمالات تجمعی نشت کوچک و ترکیبگی خط لوله در بازه زمانی $[0, t]$ در نظر گرفته شوند. همچنین اگر فرض شود که t_j^b و t_j^s به ترتیب بیانگر زمان نفوذ ز امین نقص به دیواره خط لوله و زمان فروپاشی پلاستیک ز امین نقص به علت فشار داخلی باشند. به دلیل ماهیت رقابتی حالت های شکست نشت کوچک و ترکیبگی، $P_b(t)$ و $P_s(t)$ با استفاده از t_j^b و t_j^s به صورت رابطه (۱۰) تعریف می شوند.

$$P_s(t) = \text{Prob} [(0 \leq \min_j [t_j^s] \leq t) \cap (\min_j [t_j^b] < \min_j [t_j^s])] \quad (10)$$

$$P_b(t) = \text{Prob} [(0 \leq \min_j [t_j^b] \leq t) \cap (\min_j [t_j^b] < \min_j [t_j^s])] \quad (10)$$

به طوریکه \cap بیانگر اشتراک دو حالت خرابی می باشد.

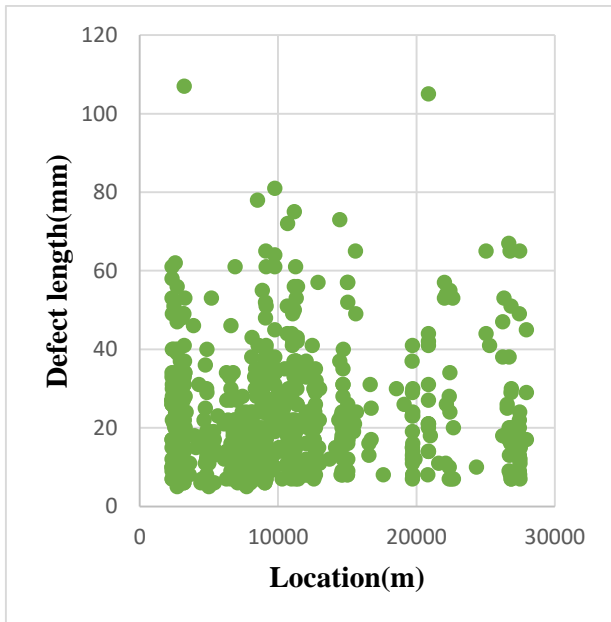
تحلیل قابلیت اطمینان سیستم

قابلیت اطمینان وابسته به زمان سیستم خطوط لوله براساس رویکرد PHI مورد ارزیابی قرار می گیرد. روش PHI براساس روش FORM شکل می گیرد احتمال شکست دو حالت خرابی نشت کوچک و ترکیبگی مربوط به هر نقص خوردگی در طول زمان را ارزیابی می کند. روش PHI از تئوری 'عبور' (Out-crossing) استفاده می کند. نرخ عبور (Out-crossing rate) براساس احتمال وجود یک عبور از رویه حالت حدی (تابع حالت حدی در $g(\mathbf{X})=0$) در دو لحظه t و $t+h$ محاسبه می شود. چنین عبوری به این معنا است که سیستم در لحظه t در ناحیه ایمن و در لحظه $t+h$ در ناحیه شکست بوده است. نرخ عبور به صورت رابطه (۱۱) تعریف می گردد

$$\nu^+(t) = \lim_{h \rightarrow 0^+} \frac{P([g(\mathbf{X}, t) > 0] \cap [g(\mathbf{X}, t+h) \leq 0])}{h} \quad (11)$$

صورت کسر رابطه (۱۰) بیانگر احتمال خرابی سیستمی است که احتمال شرطی فقط در یک تابع حالت حدی تعریف شده است و می تواند به وسیله روش مستقل از زمان FORM تخمین زده شود. بنابر این احتمال خرابی سیستم با استفاده از روش FORM به صورت زیر به دست آورد:

$$P_{\text{FORM}}([g(\mathbf{X}, t) > 0] \cap [g(\mathbf{X}, t+h) \leq 0]) = \Phi_2(\beta(t), -\beta(t+h), \mathbf{a}(t), \mathbf{a}(t+h)) \quad (12)$$



شکل ۲: طول نقص ها در سرتاسر خط لوله (توپیک رانی سال ۱۳۸۹)

براساس داده های گزارش شده از توپیک رانی هوشمند سال ۱۳۸۹، تعداد ۶۴۲ نقص در سرتاسر خط لوله گزارش شده است.

قسمت بندی خط لوله ۴۸"

به دلیل اینکه شرایط محیطی اطراف خط لوله یکی از عوامل کلیدی است که بر رشد خوردگی تأثیر می گذارد و در طول خط لوله تغییر می کند، لازم است که کل طول خط لوله را بر اساس شرایط محیطی مشابه به چند بخش پیوسته تقسیم گردد. بنابراین فرض می شود که برای هر قسمت از خط لوله، رشد تمامی نواقص خوردگی براساس مدل رشد خوردگی در آن قسمت توصیف می گردد. با توجه به این موضوع که اطلاعاتی در رابطه با شرایط محیطی اطراف خط لوله انتقال گاز و همچنین مشخصات خاک، از جمله رطوبت خاک، در دسترس نیست و در نظر داشتن این موضوع که یک همبستگی قوی بین میزان رطوبت خاک و کاهش ضخامت خط لوله وجود دارد، فرایند تقسیم سازی طول خط لوله براین اساس شکل گرفته است که در جایی که عمق نواقص خوردگی زیاد باشد رطوبت بیشتری وجود دارد. بنابراین تقسیم بندی خط لوله، براساس اندازه عمق و تعداد خوردگی های گزارش شده اجرا شده است. بر اساس داده های توپیک رانی سال ۱۳۸۹ و محدودیت های موجود به طول خط لوله ۸ قسمت نامساوی تقسیم می شود. بنابراین براساس اطلاعات موجود از توپیک رانی خط لوله، در مجموع ۸ مجموعه از مدل های رشد نقص (هر مجموعه شامل یک مدل رشد عمقی و یک مدل رشد طولی) توسعه می یابد.

حالت خرابی k ام است. $P_{f,i}^{(k),new}(t)$ را می توان از طریق رابطه (۱۷) محاسبه نمود:

$$P_{f,i}^{(k),new}(t) = P_{f,segment}^{(k),new} = \left[1 - \sum_{N'_d=1}^{\infty} P_{N'_d}(n'_d) \prod_{j=1}^{N'_d} (1 - P_{f,ij}^{(k),new}) \right] \quad (17)$$

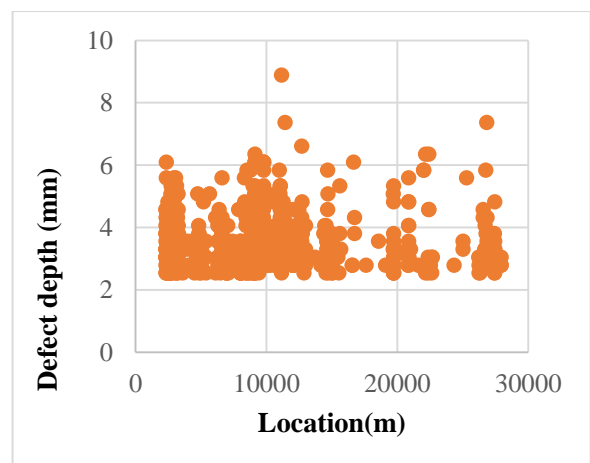
$P_{f,segment}^{(k),new}$ احتمال خرابی بخش k ام ناشی از نقص های جدید تولید شده بعد از بازرسی می باشند.

مطالعه موردی خط لوله ۴۸ اینچی انتقال گاز

خط لوله ۴۸ اینچ دارای طول ۲۸۹۸۶ متر در جنوب کشور واقع شده است و از سال ۱۳۷۳ با فشار ۱۲۳۲ psi مورد بهره برداری قرار گرفته است. جنس خط لوله ۴۸ اینچ طبق استاندارد API-5L-GR-X65 بوده و در سال ۱۳۸۹ با تکنولوژی توپیک رانی هوشمند تحت بازرسی داخلی قرار گرفته است. مشخصات آماری خط لوله مورد مطالعه در جدول (۱) خلاصه شده است و شکل های (۱) و (۲) به ترتیب عمق و طول شناسایی شده نقص ها در طول خط لوله براساس داده های گزارش شده از توپیک رانی هوشمند در سال ۱۳۸۹ را نمایش می دهند.

جدول (۱): مشخصات آماری پارامترهای خط لوله ۴۸"

پارامتر	توزیع	میانگین	ضریب تغییرات
طول خط لوله (m)	ثابت	28986	0%
قطر بیرونی خط لوله (mm)	ثابت	1220	0%
ضخامت اسمی دیواره خط لوله (mm)	نرمال	25.4	5%
تنش تسلیم (MPa)	نرمال	394.9	3%
فشار عملیاتی (MPa)	نرمال	11.94	5%



شکل ۱: عمق نقص های گزارش شده در سرتاسر خط لوله (توپیک رانی سال ۱۳۸۹)

ترتیب از طریق رتبه بندی نقص ها براساس ابعاد و نرخ وقوع مربوط به HPP تعیین می شوند. در مجموع ۱۰۰۰۰۰ سناریوی شبیه سازی MCMC در کد پایتون توسعه داده شده تولید می شود که ۲۰۰۰۰ سناریوی اول به عنوان دوره سوختگی در نظر گرفته می شوند و از آن ها صرف نظر می گردد. سپس از نمونه های سناریوها باقیمانده برای ارزیابی ویژگی های احتمالی پارامترهای مدل رشد نواقص، شامل میانگین، انحراف معیار و ماتریس کواریانس، استفاده می شود. جدول (۲) مشخصات آماری توزیع های پسین پارامترهای مدل های رشد حاصل از فرایند به روزرسانی را نمایش می دهد.

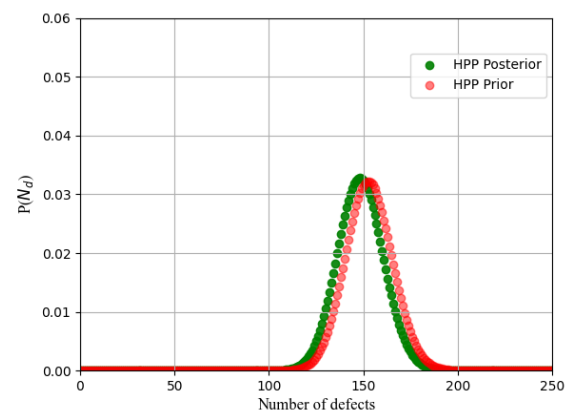
جدول ۲: مشخصات آماری توزیع های پسین حاصل از فرایند به روزرسانی برای قسمت اول خط لوله

پارا متره ای مدل رشد	ضرایب همبستگی									
	انح را ف مع بار	می ان گی ن	θ_{1d}	λ_d	θ_{2d}	σ_d	θ_{11}	λ_1	θ_{21}	σ_1
θ_{1d}	0.309	0.017	1							
λ_d	2.907	0.018	0.042	1						
θ_{2d}	0.865	0.0148	0.029	0.028	1					
σ_d	0.724	0.004	0.017	0.026	0.039	1				
θ_{11}	0.113	0.0094	0.002	0.063	0.028	0.024	1			
λ_1	2.091	0.0141	0.007	0.021	0.068	0.008	0.032	1		
θ_{21}	1.939	0.0094	0.033	0.036	0.004	0.050	0.041	0.003	1	
σ_1	1.169	0.0049	0.009	0.061	0.025	0.023	0.018	0.013	0.011	1

برای اطمینان از دقت مدل های رشد پیشنهادی برای پیش بینی اندازه نواقص، مقایسه ای بین ابعاد نواقص پیش بینی شده حاصل از مدل های رشد نقص پیشنهادی با ابعاد نواقص اندازه گیری شده مربوط به ILI انجام شده است. نتایج حاصل از مقایسه انجام شده برای قسمت اول خط لوله در شکل های (۴) الف و ب، قابل مشاهده می باشند.

توسعه مدل های احتمالاتی تولید نقص های خوردگی و رشد عمقی و طولی

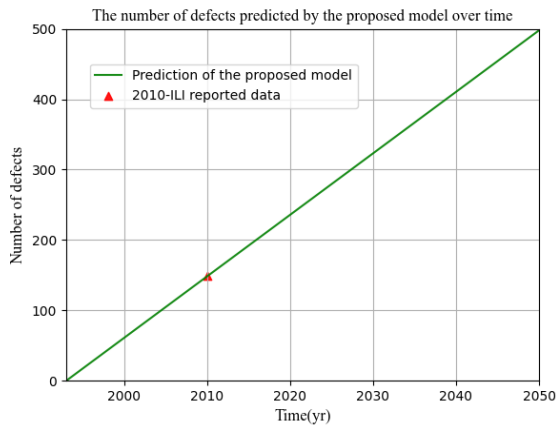
در این مقاله تنها مدل های تولید و رشد عمق و طول برای بخش اول خط لوله (شامل ۳۳۰۰ متر اول) ارائه شده است. در این پژوهش یک HPP با پارامتر نرخ وقوع λ به منظور احتمال تولید نواقص، یعنی تابع درست نمایی، در هر قسمت از خط لوله در نظر گرفته شده است. بر اساس این مدل، متوسط تعداد نواقص، μ_d ، ایجاد شده در یک بازه زمانی $t = 0, [0, t]$ ، زمان نصب خط لوله، در یک قسمت معین از خط لوله، از میانگین تابع توزیع پواسون پیروی می کند. برای هر قسمت از خط لوله توابع توزیع گاما به عنوان توزیع های پیشین در فرایند به روزرسانی بیژین مربوط به تعیین پارامتر مجهول HPP در نظر گرفته شده اند. ارزیابی پارامتر مدل تولید نقص (λ) بر اساس داده های بازرسی در فرایند به روزرسانی بیژین با استفاده از تکنیک MCMC اجرا شده است. برای هر قسمت از خط لوله در مجموع ۱۰۰۰۰۰ توالی شبیه سازی MCMC براساس کد پایتون توسعه داده شده اجرا گردید، به طوری که ۲۰۰۰۰ توالی اول فرایند به روزرسانی به عنوان دوره سوختگی در نظر گرفته شد و از آن ها صرف نظر گردید. تابع جرم احتمال توزیع پواسون قبل و بعد از فرایند به روزرسانی MCMC برای پارامتر نرخ وقوع مربوط به قسمت اول خط لوله در شکل (۳) نمایش داده شده است.



شکل ۳: احتمال وجود تعداد نواقص در قسمت اول خط لوله

در فرایند به روزرسانی پارامترهای مجهول مدل های رشد طولی و عمقی نواقص توابع توزیع نرمال به عنوان توزیع های پیشین در نظر گرفته شدند. هنگامی که رابطه قانون توانی زمان به عنوان مدل احتمالاتی رشد نقص در نظر گرفته می شود، باید زمان شروع خوردگی را تخمین زد. با این فرض که نقص با ابعاد شناسایی شده بزرگتر زودتر رخ می دهد، زمان شروع هر نقص به صورت منحصر به نقص در نظر گرفته می شود و برای این زمان یک تابع توزیع گاما استفاده می شود. توزیع گاما دارای پارامتر شکل z و پارامتر مقیاس λ_m می باشد و به

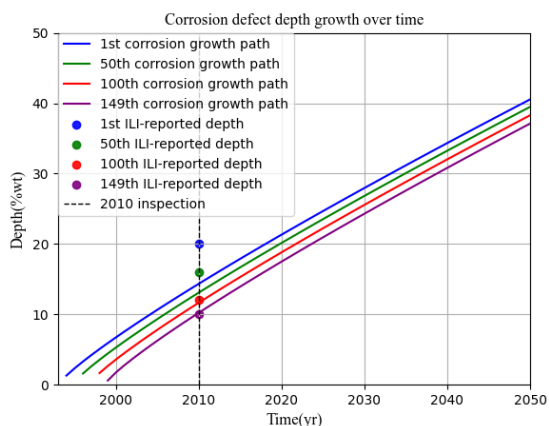
۱۳۸۹ در قسمت اول خط لوله در تطابق قابل قبولی با مقدار میانگین HPP در آن زمان است. از این رو براساس داده های بازرسی سال ۱۳۸۹ مدل HPP با دقت معقولی قادر است تا تعداد نواقصی که بعد از این زمان بازرسی بر روی خط لوله شکل می گیرند را پیش بینی کند.



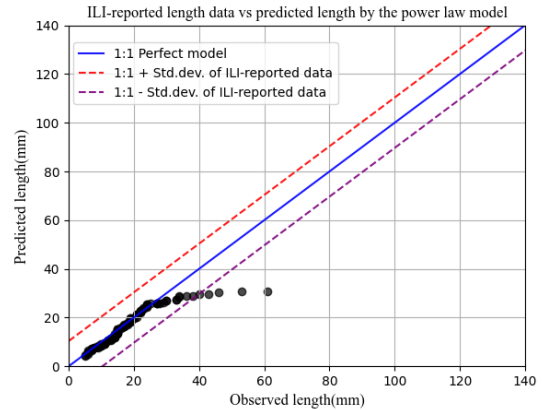
شکل(۵): تعداد نواقص پیش بینی شده توسط مدل HPP در قسمت اول

پیش بینی رشد نقص ها براساس مدل قانون توانی زمان

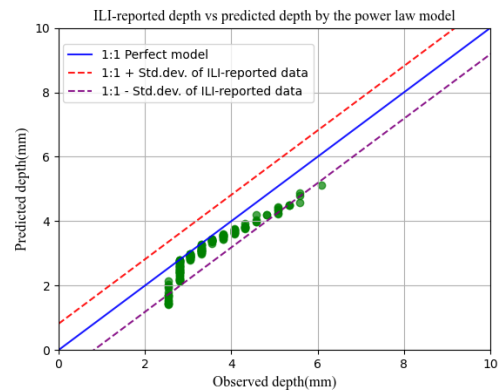
شکل(۶) الف و ب، رشد عمقی و طولی پیش بینی شده نواقص انتخابی در قسمت اول خط لوله را براساس مدل قانون توانی زمان نشان می دهد. برای مقایسه، عمق گزارش شده توسط ILI در سال ۱۳۸۹ نیز در همین شکل نشان داده شده است. منحنی مربوط به رشد عمقی نواقص مربوط به قسمت اول خط لوله نشان می دهد که پیش بینی های به دست آمده از مدل قانون توانی زمان برای رشد عمقی نواقص به طور منطقی قابل قبول می باشند. براساس این شکلها مشخص می شود که در مراحل اولیه خوردگی تمایل به نرخ رشد بالاتری دارد. زمانی که خوردگی در ناحیه پایدار قرار می گیرد نرخ رشد تقریباً ثابت و رشد نواقص در طول زمان به صورت خطی می باشد.



الف: رشد عمقی



الف) طول پیش بینی شده برای قسمت اول



ب) عمق پیش بینی شده برای قسمت اول

شکل ۴: مقایسه بین ابعاد نواقص پیش بینی شده حاصل از مدل های رشد نقص پیشنهادی با ابعاد نواقص اندازه گیری شده مربوط به ILI براساس بازرسی سال ۱۳۸۹

برای یک مدل پیش بینی کامل، داده های پیش بینی شده توسط مدل باید در امتداد خط ثابت ۱:۱، خط آبی رنگ نشان داده شده در شکل(۴) قرار گیرند. این شکل نشان می دهد که به طور منطقی پیش بینی ارائه شده توسط مدل های پیشنهادی رشد نواقص قابل قبول و مناسب می باشند؛ زیرا اکثر اندازه های نواقص پیش بینی شده توسط مدل ها در منطقه محدود شده توسط دو خط چین، خطوط احاطه کننده مدل کامل، قرار می گیرند که انحراف استاندارد مربوط به داده های توپک رانی اجرا شده را نشان می دهند. نتایج نشان داده شده تأیید می کنند که مدل های رشد پیشنهادی در اکثر موارد برای ارائه پیش بینی بدون جهت گیری و با دقت قابل قبول، قابل اعتماد هستند.

پیش بینی میانگین تعداد نقص ها براساس مدل HPP

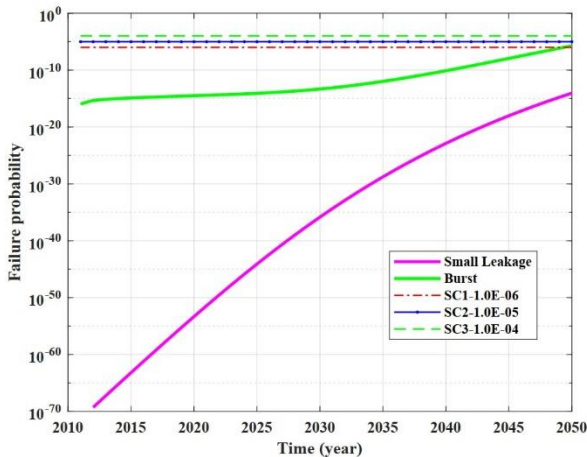
همانطور که بیان شد فرآیند آماری پواسون همگن به عنوان مدل احتمالاتی برای تعداد نواقص شکل گرفته بر روی خط لوله در نظر گرفته شد. شکل (۵) پیش بینی تعداد متوسط نواقص شکل گرفته در قسمت اول خط لوله را براساس مقدار میانگین توزیع پواسون و همچنین تعداد نواقص گزارش شده در بازرسی سال ۱۳۸۹ نمایش می دهد. همانطور که در شکل مشخص است تعداد کل نواقص در زمان بازرسی

جدول ۳: احتمالات شکست هدف برای خطوط لوله مدفون [۲۰]

Limit State	Safety Class		
	Low	Medium	High
SLS (service-ability limit state)	10^{-2}	10^{-3}	10^{-3}
ULS (ultimate limit state)	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
FLS (fatigue limit state)	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}
ALS (accidental limit state)	10^{-4}	10^{-5}	10^{-5}

در این پژوهش مطابق با فاز طراحی، احتمالات شکست هدف ULS در نظر گرفته شده است.

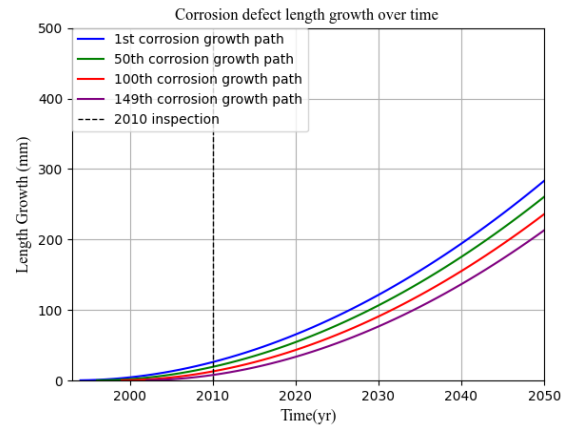
شکل (۷) احتمالات شکست را برای دو نوع حالت خرابی در قسمت اول خط لوله براساس اطلاعات استخراج شده از بازرسی صورت گرفته در سال ۱۳۸۹ نشان می‌دهد. خطوط سبز و بنفش رنگ به ترتیب بیانگر احتمال شکست مربوط به حالت های خرابی ترکیب و نشت کوچک به ازای زمان شامل نواقص مشخص شده در بازرسی در قسمت اول از خط لوله را نشان می‌دهند.



شکل ۷: احتمال خرابی نشت و ترکیبگی براساس نواقص گزارش شده در قسمت اول خط لوله در سال ۱۳۸۹

همچنین احتمال شکست محاسبه شده برای هر حالت خرابی با سه احتمال شکست هدف ULS مربوط به سه کلاس ایمنی متوسط، بالا و بسیار بالا در این شکل ها مورد مقایسه قرار گرفته است. در مواردی که احتمال خرابی از احتمال شکست هدف در یک زمان معین بیشتر شود، نشان دهنده این است که قبل از آن نقطه زمانی یک اقدام مناسب (مانند تعمیر یا جایگزینی) برای آن قسمت از خط لوله مورد نیاز است.

شکل (۸) احتمالات شکست به ازای زمان را برای دو نوع حالت خرابی شامل نواقص مشخص شده در بازرسی و نواقص جدید ایجاد شده در قسمت از خط لوله را نمایش می‌دهد. خط زرد و قرمز رنگ به ترتیب بیانگر احتمال شکست مربوط به حالت های خرابی ترکیب و نشت کوچک به ازای زمان شامل نواقص گزارش شده و نواقص جدید پیش بینی شده بعد از بازرسی سال ۱۳۸۹ می‌باشند. با توجه به شکل می‌توان دریافت که تأثیر نواقص جدید تنها پس از سال ۲۰۴۰ قابل توجه



ب: رشد طولی

شکل ۶: پیش بینی رشد عمق توسط مدل قانون توانی زمان برای قسمت اول خط لوله براساس داده های بازرسی سال ۲۰۱۰

احتمال شکست خط لوله

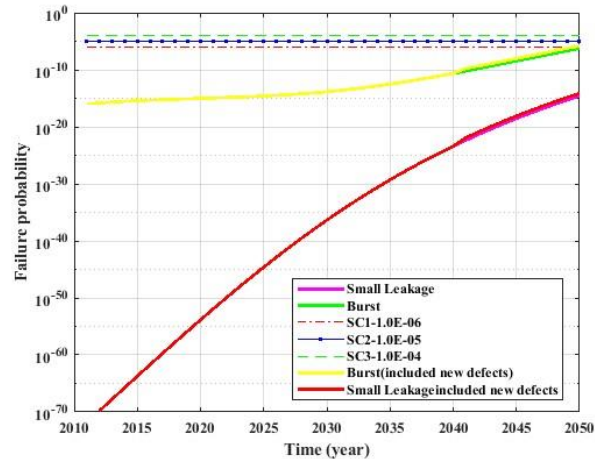
ارزیابی عملکرد یک سیستم خط لوله و احتمال شکست آن با استفاده از تحلیل قابلیت اطمینان محاسبه می‌شود. روش ارزیابی قابلیت اطمینان برای قسمت اول خط لوله از مدل های احتمالاتی تعداد و رشد نواقص توسعه داده شده در قسمت قبل برای پیش بینی ایجاد و رشد وابسته به زمان نواقص در هر دو جهت عمقی و طولی استفاده می‌کند. احتمال شکست که به صورت یک سیستم سری از نواقص شناسایی شده و نواقص جدید ایجاد شده تعریف می‌شود، برای قسمت اول خط لوله در بازرسی سال ۱۳۸۹ ارزیابی می‌گردد. عدم قطعیت های در نظر گرفته شده در تحلیل قابلیت اطمینان صورت گرفته شامل خطای مدل در مدل پیش بینی، عدم قطعیت های آماری در پارامترهای مدل، عدم قطعیت در خواص مکانیکی و هندسی خط لوله (مانند ضخامت دیواره خط لوله) و فشار کاری خط لوله است که در جدول (۱) نشان داده شده است. علاوه بر این، خطای مدل برای ظرفیت فشار ترکیبگی (e_{cp}) برابر با ۱ در نظر گرفته می‌شود. ارزیابی احتمال شکست وابسته به زمان قسمت اول خط لوله با پیاده سازی الگوریتم های روش FORM و PHI3 در زبان برنامه نویسی MATLAB برای دو حالت خرابی متمایز، یعنی نشت کوچک و ترکیبگی، روابط (۵) و (۶) ارزیابی می‌شود. به منظور بررسی تأثیر نواقص ایجاد شده جدید، احتمال خرابی در قسمت اول با در نظر گرفتن نواقص مشخص شده بازرسی و نواقص جدید ایجاد شده بعد از بازرسی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

برای ارزیابی عملکرد خطوط لوله باید نوع حالت حدی و سطح کلاس ایمنی با شرایطی که در مرحله طراحی در نظر گرفته شده است سازگار باشد و احتمال شکست محاسبه شده کمتر از احتمال شکست هدف باشد تا الزامات ایمنی برآورده گردند. استاندارد DNV همانطور که در جدول (۳) نشان داده شده است، احتمال شکست هدف را برای چهار نوع حالت حدی و سه کلاس ایمنی تعریف می‌کند [۲۰].

شده اند. طول کلی خط لوله براساس مشخصات خاک احاطه کننده خط لوله به تعدادی قسمت تقسیم بندی شده است. عملکرد خط لوله از طریق احتمال شکست خط لوله در هر قسمت بر اساس تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان ارزیابی شده است. هر قسمت از خط لوله به عنوان یک سیستم سری شامل اجزاء در نظر گرفته می شود بطوریکه این اجزاء شامل نقص های شناسایی شده و جدید ایجاد شده در آن قسمت می باشند. در تحلیل قابلیت اطمینان شامل عدم قطعیت آماری مربوط به پارامترهای مدل رشد، عدم قطعیت در خواص مکانیکی و فشار کاری خط لوله و خطاهای مدل در نظر گرفته شده اند. نتایج حاصل از این مطالعه به شرح زیر خلاصه می شود:

- مدل های احتمالی پیشنهادی رشد عمقی و طولی نواقص را می توان برای داده های میدانی با نواقص انطباقی یا غیر انطباقی اعمال کرد.
- مدل های احتمالی توسعه یافته رشد نواقص را می توان نه تنها برای پیش بینی رشد وابسته به زمان نقص های شناسایی شده، بلکه برای ارزیابی رشد نواقص ایجاد شده جدید بعد از آخرین بازرسی نیز مورد استفاده قرار داد.
- مدل های پیشنهادی رشد نواقص به منظور پیش بینی رشد ابعاد نقص، زمان شروع خوردگی منحصر به فردی را برای هر نقص فردی در نظر می گیرند.
- نتایج ارزیابی قابلیت اطمینان مربوط به قسمت اول خط لوله نشان می دهد که حالت خرابی ترکیدگی عامل مهمتر در شکست این بخش از خط لوله می باشد. این نتیجه نشان دهنده نقش رشد طولی نقص های خوردگی در احتمال خرابی خط لوله است.
- زمانی که عملکرد بلندمدت خط لوله باید پیش بینی شود، نواقص ایجاد شده جدید باید در تجزیه و تحلیل قابلیت اطمینان در نظر گرفته شوند. همچنین تاثیر نواقص جدید بر روی احتمال شکست مود خرابی نشت کوچک نسبت به مد خرابی ترکیدگی زود تر نمایان می شود.
- نتایج احتمال خرابی به ازای زمان نشان می دهد که با گذشت زمان نرخ احتمال حالت خرابی نشت کوچک کاهش می یابد، زیرا خوردگی در مراحل اولیه با سرعت بیشتری اتفاق می افتد اما با گذشت زمان وارد مرحله پایداری می شود.

می شود. بنابراین، این نتیجه نشان می دهد که احتمال شکست تنها با در نظر گرفتن نواقص شناسایی شده می تواند برای ارزیابی عملکرد کوتاه مدت مورد استفاده قرار گیرد و در زمانی که نیاز به ارزیابی عملکرد بلندمدت است، باید نواقص ایجاد شده جدید در نظر گرفته شوند.



شکل ۸: احتمال خرابی نشت و ترکیدگی براساس نواقص گزارش شده در سال ۱۳۸۹ و نواقص جدید شکل گرفته در قسمت اول خط لوله بعد از سال ۱۳۸۹

نتیجه گیری و جمع بندی

این پژوهش احتمال خرابی سیستم وابسته به زمان یک خط لوله فولادی دارای نواقص خوردگی خارجی را مورد ارزیابی قرار داده است. فرمول بندی های فرایند پواسون همگن و تابع قانون توانی زمان به ترتیب برای مدل سازی تعداد و رشد نقص خوردگی، عمق و طول، به کار گرفته شده است. پارامترهای مدل بر اساس داده های بازرسی درون خطی با استفاده از رویکرد بیژین و از طریق شبیه سازی زنجیره مارکوف مونت کارلو (MCMC) ارزیابی شده اند. به منظور در نظر گرفتن همبستگی مدل های رشد عمقی و طولی یک توزیع نرمال دو متغیره برای ساخت تابع درستنمایی در استنباط بیژین استفاده شده است. علاوه بر این، زمان شروع هر نقص شناسایی شده به صورت تصادفی و براساس فرایند پواسون همگن تعیین شده است. برای هر نقص دو حالت شکست متمایز، یعنی نشت کوچک و ترکیدگی در نظر گرفته شده است. به منظور در نظر گرفتن همبستگی دو حالت خرابی مربوط به هر نقص، از روش PHI3 مبتنی بر روش قابلیت اطمینان مرتبه اول FORM، در تعیین احتمال خرابی های نشت کوچک و ترکیدگی استفاده شده است.

در این پژوهش مدل های احتمالاتی پیشنهاد شده به منظور پیش بینی تولید و رشد نقص های خوردگی بر روی خط لوله انتقال گاز طبیعی به طول تقریبی ۲۸،۹ کیلومتر واقع در جنوب کشور بکار گرفته شده اند. پارامترهای مربوط به مدل های احتمالاتی براساس داده های میدانی به دست آمده از بازرسی درون خطی اجرا شده در سال ۱۳۸۹ استخراج

مراجع

- [1] Ahammed, M. and R. Melchers, *Probabilistic analysis of underground pipelines subject to combined stresses and corrosion*. Engineering structures, 1997. **19**(12): p. 988-994.
- [2] Miran, S.A., Q. Huang, and H. Castaneda, *Time-dependent reliability analysis of corroded buried pipelines considering external defects*. Journal of Infrastructure Systems, 2016. **22**(3): p. 04016019.
- [3] Amirat, A., A. Benmoussat, and K. Chaoui, *Reliability assessment of underground pipelines under active corrosion defects*, in *Damage and fracture mechanics*. 2009, Springer. p. 83-92.
- [4] Karami, M., *Review of corrosion role in gas pipeline and some methods for preventing it*. Journal of pressure vessel technology, 2012. **134**(^o)
- [5] Kariyawasam, S. and W. Peterson. *Effective improvements to reliability based corrosion management*. in *International Pipeline Conference*. 2010.
- [6] Hong, H.P., *Inspection and maintenance planning of pipeline under external corrosion considering generation of new defects*. Structural safety, 1999. **21**(3): p. 203-222.
- [7] Valor, A., et al., *Stochastic modeling of pitting corrosion: a new model for initiation and growth of multiple corrosion pits*. Corrosion science, 2007. **49**(2): p. 559-579.
- [8] Al-Amin, M. and W. Zhou, *Evaluating the system reliability of corroding pipelines based on inspection data*. Structure and Infrastructure Engineering, 2014. **10**(9): p. 1161-1175.
- [9] Zhang, S., W. Zhou, and H. Qin, *Inverse Gaussian process-based corrosion growth model for energy pipelines considering the sizing error in inspection data*. Corrosion Science, 2013. **73**: p. 309-320.
- [10] Alamilla, J., M. Espinosa-Medina, and E. Sosa, *Modelling steel corrosion damage in soil environment*. Corrosion Science, 2009. **51**(11): p. 2628-2638.
- [11] Caleyó, F., et al., *Probability distribution of pitting corrosion depth and rate in underground pipelines: A Monte Carlo study*. Corrosion Science, 2009. **51**(9): p. 1925-1934.
- [12] Velázquez, J., et al., *Predictive model for pitting corrosion in buried oil and gas pipelines*. Corrosion, 2009. **65**(5): p. 332-342.
- [13] Qin, H. and W. Zhou. *Reliability analysis of corroding pipelines considering the growth and generation of corrosion defects*. in *International Pipeline Conference*. 2014. American Society of Mechanical Engineers.
- [14] Wang, H., et al., *Bayesian modeling of external corrosion in underground pipelines based on the integration of Markov chain Monte Carlo techniques and clustered inspection data*. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2015. **30**(4): p. 300-316.
- [15] Zhang, S. and W. Zhou, *Bayesian dynamic linear model for growth of corrosion defects on energy pipelines*. Reliability Engineering & System Safety, 2014. **128**: p. 24-31.
- [16] Betz, W., I. Papaioannou, and D. Straub, *Transitional markov chain monte carlo: observations and improvements*. Journal of Engineering Mechanics, 2016. **142**(5): p. 04016016.
- [17] Gong, C. and W. Zhou, *First-order reliability method-based system reliability analyses of corroding pipelines considering multiple defects and failure modes*. Structure and Infrastructure Engineering, 2017. **13**(11): p. 1451-1461.
- [18] Sahraoui, Y., R. Khelif, and A. Chateaufneuf, *Maintenance planning under imperfect inspections of corroded pipelines*. International journal of pressure vessels and piping, 2013. **104**: p. 76-82.
- [19] Kiefner, J.F. and P.H. Vieth, *A modified criterion for evaluating the remaining strength of corroded pipe*. 1989, Battelle Columbus Div., OH (USA).
- [20] Veritas, D.N., *Submarine pipeline systems, offshore standard DNV-OS-F101*. Norsok Standard (August), 2012. **367**.