

شناسایی عیوب خطوط لوله با استفاده از آنالیز ارتعاش ناشی از عبور جرم متحرک از داخل آنها

بهزاد توناخانه بناب

دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، Behzad.t.bonab@gmail.com

مرتضی صادقی*

استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، morteza@tabrizu.ac.ir

میرمحمد اتفاق

دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران، ettefagh@tabrizu.ac.ir

چکیده

این پژوهش روشی نوین برای تشخیص زودهنگام عیوب در خطوط لوله صنعتی، با تمرکز بر شل‌شدگی اتصالات فلنجی، ارائه می‌دهد که از تحلیل ارتعاشات ناشی از جرم متحرک داخلی (پیگ در خطوط لوله صنعتی) بهره می‌برد. پیگ در این روش دوگانه عمل می‌کند، هم به‌عنوان محرک ارتعاشات کنترل‌شده و هم به‌عنوان بخشی از فرایند استاندارد نگهداری خطوط لوله. داده‌های ارتعاشی با ترکیب مدل‌های پارامتری و الگوریتم‌های یادگیری ماشین پردازش می‌شوند تا کاهش سفتی اتصالات را حتی پیش از بروز نشستی یا آسیب‌های غیرقابل جبران شناسایی کنند.

مزیت کلیدی این روش، حذف نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی پیچیده و محرک‌های اضافی است، چرا که پیگ به‌طور ذاتی در فرآیندهای صنعتی موجود است. این رویکرد در مقایسه با روش‌های مرسوم مبتنی بر فرکانس، حساسیت بالاتری به تغییرات موضعی نشان می‌دهد و در محیط‌های صنعتی عملکردی پایدار دارد. آزمایش‌ها اثربخشی آن را در شناسایی الگوهای ارتعاشی مرتبط با شل‌شدگی تأیید می‌کنند. این ویژگی‌ها، روش پیشنهادی را به ابزاری عملی و مقرون‌به‌صرفه برای پایش سلامت خطوط لوله در صنایع نفت و گاز تبدیل می‌کند.

واژه‌های کلیدی: عیوب خطوط لوله، پیگ (PIG)، آنالیز ارتعاشی، مدل‌سازی پارامتری، جرم متحرک، اتصالات فلنجی.

Detection of Pipeline Defects Through Vibration Analysis Induced by the Passage of a Moving Mass Within Them

B. Totakhaneh Bonab

Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

M. Sadeghi

Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

M. M. Ettefagh

Faculty of Mechanical Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Abstract

This study presents a novel method for the early detection of defects in industrial pipelines, with a focus on identifying loosening in flange joints. The approach leverages vibration analysis induced by an internal moving mass (referred to as a "pig" in industrial pipelines). The pig serves a dual role in this method: acting both as a controlled vibration exciter and as part of standard pipeline maintenance procedures. Vibration data are processed through a combination of parametric models and machine learning algorithms to detect reductions in joint stiffness, even before leaks or irreversible damage occur.

A key advantage of this method is its elimination of the need for complex laboratory equipment or additional exciters, as the pig is inherently integrated into existing industrial processes. Compared to conventional frequency-based techniques, the proposed approach exhibits higher sensitivity to localized changes and maintains stable performance in industrial environments. Experimental results confirm its effectiveness in identifying vibration patterns associated with joint loosening. These features render the proposed method a practical and cost-effective tool for pipeline health monitoring in the oil and gas industry.

Keywords: Pipeline Defects; PIG; Vibration Analysis; Parametric Modeling; Moving Mass; Flanged Joints.

۱- مقدمه

مقابل، آنالیز ارتعاشی به‌عنوان یک روش غیرمخرب، با رصد تغییرات دینامیکی در ساختار لوله، امکان پایش بلادرنگ و مستمر را فراهم می‌کند. این روش با بهره‌گیری از ارتعاشات طبیعی ناشی از فرآیندهای جاری (مانند حرکت پیگ در خطوط لوله)، وابستگی به محرک‌های مصنوعی (مثل چکش یا تحریک‌کننده ارتعاشی^۱) را حذف کرده و از نظر اقتصادی و فنی نیز بهینه است [۲].

مزیت کلیدی استفاده از آنالیز ارتعاشی، حساسیت بالا به تغییرات موضعی (مانند کاهش سفتی اتصالات) و تشخیص عیوب در مراحل اولیه است. در حالی که روشهای NDT رایج یا بازرسی بصری اغلب تنها

خطوط لوله، شاه‌رگ‌های حیاتی صنایع نفت، گاز و پتروشیمی به شمار می‌آیند که انتقال ایمن و پایدار منابع انرژی را ممکن می‌سازند. با این حال، وجود عیوبی نظیر شل‌شدگی اتصالات فلنجی، خوردگی، یا ترک‌های ریز می‌تواند به پیامدهای فاجعه‌باری مانند نشت مواد خطرناک، آلودگی محیط زیست، توقف عملیات با هزینه‌های سنگین، و حتی تهدید جان نیروی انسانی منجر شود [۱]. تشخیص زودهنگام این نواقص پیش از تشدید آسیب، نه تنها ایمنی سیستم را تضمین می‌کند، بلکه از هزینه‌های تعمیرات غیرمنتظره و توقف تولید نیز می‌کاهد.

روش‌های سنتی بازرسی مانند تست هیدرواستاتیک یا بازرسی چشمی، عموماً واکنشی، پرهزینه و نیازمند توقف عملیات هستند. در

¹ Shaker

آسیب‌های پیشرفته را شناسایی می‌کنند [۳ و ۴].

روش‌های مبتنی بر ارتعاشات با تحلیل تغییرات در فرکانس‌های طبیعی سازه، قادرند محل و شدت آسیب را حتی با داده‌های محدود تشخیص دهند. برای مثال، شل‌شدگی اتصالات پیچ و مهره‌ای که به کاهش سفتی موضعی می‌انجامد، از طریق پاسخهای ارتعاشی غیرخطی به طور مؤثر آشکار می‌شود [۵]. با این حال، چالش اصلی در محیط‌های صنعتی، تحریک مؤثر سازه است؛ چراکه پژوهش‌های پیشین عمدتاً از محرک‌های آزمایشگاهی (مانند چکش) استفاده کرده‌اند که در مقیاس واقعی کاربردپذیری پایینی دارند [۶].

نوآوری محوری این پژوهش در استفاده از جرم متحرک (پیگ)، ابزار پاک‌ساز و بازرسی خطوط لوله در صنعت نفت و گاز، به عنوان منبع تحریک ارتعاشات است که همزمان با فرآیند استاندارد نگهداری خطوط لوله، داده‌های ارتعاشی را برای تشخیص شل‌شدگی اتصالات فلنجی تولید می‌کند. این رویکرد که برای نخستین بار توسط نویسندگان ارائه شده، از قابلیت اجرا در محیط‌های صنعتی برخوردار است. مطالعات اخیر نیز نشان می‌دهند سیستم‌های مبتنی بر جرم متحرک می‌توانند تغییرات دینامیکی ناشی از عیوب را حتی در مراحل اولیه شناسایی کنند [۷]. با این وجود، مرور پیشینه موجود نشان می‌دهد که اگرچه برخی مطالعات مانند صادقی و همکاران [۸] اثر پارامترهای فیزیکی پیگ بر رفتار دینامیکی خطوط لوله را بررسی کرده‌اند، اما هیچ‌یک از این پژوهش‌ها پیگ را به‌عنوان ابزاری فعال برای تشخیص عیوب و پایش سلامت ساختاری معرفی نکرده‌اند. بنابراین، جای خالی یک رویکرد یکپارچه که همزمان از پیگ به‌عنوان منبع تحریک ارتعاشی و ابزار عیب‌یابی بهره بگیرد، در ادبیات علمی مشهود است.

پیشینه تحقیقاتی در حوزه شل‌شدگی اتصالات، از مطالعات پایه‌ای یانکر [۹] درباره مکانیزم‌های شل‌شدگی ناشی از ارتعاشات آغاز می‌شود. پس از آن، گروپر [۱۰] پاسخ‌های دینامیکی اتصالات را تحلیل کرد و پای و هس [۱۱] سه ناحیه بحرانی در فرآیند شل‌شدگی را معرفی نمودند. در سال‌های اخیر، پژوهشگرانی مانند اسماعیل [۱۲] و هی و ژو [۱۳] بر توسعه روش‌های تشخیص شل‌شدگی در خطوط لوله متمرکز شده‌اند. همچنین، ادغام یادگیری ماشین با تحلیل ارتعاشات، دقت تشخیص را بهبود چشمگیری بخشیده است [۱۴]. برای نمونه، نیکولز و همکاران [۱۵] با استفاده از تبدیل فوریه و میلانس [۱۶] با تحلیل محتوای فرکانسی، شل‌شدگی را شناسایی کردند. مطالعه نوین غریب‌خانین و همکاران [۱۷] نیز با مقایسه روش‌های تحلیل مودال تجربی (EMA^۱) و عملیاتی (OMA^۲)، کاهش فرکانس‌های طبیعی و تغییرات شکل مودها را به عنوان شاخص‌های کلیدی آسیب معرفی کرده‌اند.

در حوزه رفتار غیرخطی اتصالات فلنجی، میثمی و همکاران [۱۸] با بررسی تحلیلی و آزمایشگاهی، تأثیر بارگذاری طولی و خمشی بر این اتصالات را تحلیل کرده و نشان دادند که تغییرات سفتی موضعی می‌تواند به عنوان شاخصی برای تشخیص آسیب مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، یادآور نیک‌روش و گودرزی [۱۹] با بکارگیری

روش مدولاسیون ویبروآکوستیک، شل‌شدگی اتصالات پیچی فلنجی را بصورت تجربی و عددی بررسی کرده و دقت این روش در تشخیص آسیب را تأیید نموده‌اند. بررسی انتقادی این مطالعات نشان می‌دهد که اغلب روش‌های موجود یا به تجهیزات آزمایشگاهی پیچیده وابسته‌اند، یا تنها قادر به شناسایی آسیب در مراحل پیشرفته هستند و یا حساسیت کافی به تغییرات موضعی ندارند. بنابراین، هنوز خلأ پژوهشی قابل توجهی در زمینه توسعه روش‌های کم‌هزینه، درون‌خطی^۳ و حساس به آسیب‌های اولیه وجود دارد.

در این پژوهش، روشی نوین برای تشخیص زودهنگام شل‌شدگی اتصالات فلنجی در خطوط لوله صنعتی ارائه شده است که از تحلیل ارتعاشات ناشی از حرکت پیگ بهره می‌برد. این روش با الهام از پژوهش پیشین نویسندگان [۲۰]، بر پایه ترکیب مدل‌سازی پارامتری و الگوریتم‌های یادگیری ماشین توسعه یافته است. در این رویکرد، پیگ دو نقش کلیدی ایفا می‌کند، هم به عنوان محرک ارتعاشات کنترل‌شده و هم به عنوان جزئی از فرآیند استاندارد نگهداری خطوط لوله در شرایط عملیاتی. داده‌های ارتعاشی تولیدشده توسط جابه‌جایی پیگ، پردازش می‌شوند تا کاهش تدریجی سفتی اتصالات را حتی پیش از وقوع نشی یا آسیب‌های جبران‌ناپذیر شناسایی کنند. مزیت اصلی این روش، حذف نیاز به تجهیزات آزمایشگاهی پیچیده و محرک‌های مصنوعی است، چرا که ارتعاشات ناشی از حرکت پیگ، که به‌طور ذاتی در فرآیندهای صنعتی وجود دارد، به عنوان منبع داده استفاده می‌شود. به این ترتیب، پژوهش حاضر علاوه بر پرکردن شکاف‌های پژوهشی شناسایی‌شده، گامی عملی در جهت کاربرد صنعتی روش‌های پایش سلامت سازه‌های محسوب می‌شود. مقایسه نتایج با روش‌های مرسوم مبتنی بر فرکانس (مانند تحلیل مودال [۱۳]) نشان می‌دهد الگوریتم پیشنهادی حساسیت بالاتری به تغییرات موضعی در اتصالات دارد و در شرایط واقعی صنعتی (مانند لوله‌های تحت تأثیر نویز و ارتعاشات عملیاتی پیگ) از دقت و پایداری عملکردی برجسته‌ای برخوردار است. این پژوهش، گامی مؤثر در جهت تبدیل پیگ به یک حسگر پویا در حین انجام وظایف عادی خود است، به‌طوری که علاوه بر پاک‌سازی خطوط لوله، به عنوان ابزاری برای پایش سلامت سازه نیز عمل می‌کند. این یکپارچه‌سازی نه‌تنها هزینه‌های اجرایی را کاهش می‌دهد، بلکه امنیت عملیاتی در صنایع نفت و گاز را با تشخیص زودهنگام عیوب، به‌صورت چشمگیری افزایش می‌دهد.

۲- تعریف شاخص عیب

در این بخش، دو شاخص کمی برای شناسایی شل‌شدگی اتصالات فلنجی، به عنوان یکی از عیوب رایج در خطوط لوله صنعتی، معرفی شده‌اند. شاخص اول مبتنی بر مدل‌سازی پارامتری و فاصله مالااتویسیس است [۲۰]، در حالی که شاخص دوم از تغییرات فرکانس طبیعی سیستم در اثر آسیب، بهره می‌برد.

^۱ Experimental Modal Analysis

^۲ Operational Modal Analysis

^۳ In-line

استفاده از فرم زیر ارزیابی می‌شوند، جایی که فرکانس اصلی α_1 و اولین $p_a/2$ هارمونیک‌های آن به کار گرفته می‌شوند (با فرض اینکه p_a یک عدد زوج باشد) [۲۵]:

$$a_i[t] = a_{i,0} + \sum_{k=1}^{p_a/2} \left\{ a_{i,2k-1} \cos \left[\frac{2\pi k \alpha_1 t}{f_s} \right] + \dots + a_{i,2k} \sin \left[\frac{2\pi k \alpha_1 t}{f_s} \right] \right\} \quad (3)$$

در رابطه بالا p_a ابعاد پایه را مشخص می‌کند، $k = 1, \dots, p_a$ ضرایب طرح‌ریزی مدل را مشخص می‌کند و f_s فرکانس نمونه برداری (بر حسب هرتز) است. برای تخمین مدل FS-TAR کافی است بردار ضریب پیش بینی $\theta = [a_{1,0} \dots a_{n_a, p_a}]^T \in R^{n_a \cdot (p_a + 1)}$ را تخمین بزینم که می‌توان با استفاده از حداقل مربعات معمولی یا وزنی انجام داد [۲۲]. انتخاب روش برای مرتبه مدل n_a توابع پایه، و p_a ابعاد پایه، توسط یک جستجوی تکراری گسسته انجام می‌شود که بر اساس حداقل کردن یک معیار مناسب مانند RSS/SSS یا BIC است [۲۲].

در تجزیه و تحلیل چند متغیره، فاصله ماهالانوبیس اغلب به عنوان یک معیار مناسب برای تعیین اختلاف دو توزیع استفاده می‌شود [۲۶]. در این مقاله، فاصله ماهالانوبیس بین ضرایب مدل شناسایی شده برای حالت معیوب (فلنج شل شده) و حالت سالم (فلنج کاملاً سفت شده) برای تعریف شاخص عیب (DI) استفاده شده است. به طور دقیق‌تر، از آنجایی که ضرایب مدل پارامتری به عنوان بردار ویژگی عیب (شل شدگی) عمل می‌کنند، DI به صورت نسبت $\Delta(\mathbf{y}_t, \boldsymbol{\mu}_{f,t}, \boldsymbol{\Sigma}_{f,t})$ به $\Delta(\mathbf{y}_t, \mathbf{0}, \boldsymbol{\Sigma}_{f,t})$ ، به طوری که $\boldsymbol{\mu}_{f,t}$ و $\boldsymbol{\Sigma}_{f,t}$ بردار میانگین و ماتریس هم‌وردایی پارامترهای مدل مربوط به مجموعه داده سالم است، تعریف می‌شود. \mathbf{y}_t و $\mathbf{y}_{f,t}$ به ترتیب بردار پارامتر مدل مربوط به مجموعه داده سالم و معیوب هستند. شاخص عیب معرفی شده نشان دهنده نسبت فاصله ماهالانوبیس از یک مورد معیوب به یک مورد سالم در مقابل نسبت فاصله ماهالانوبیس از حالت سالم به حالت صفر است. در واقع، این شاخص برای اندازه‌گیری تغییرات فاصله ماهالانوبیس ناشی از وجود عیب در سازه است. فرمول شاخص عیب (DI) را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$DI = \frac{\Delta(\mathbf{y}_t, \boldsymbol{\mu}_{f,t}, \boldsymbol{\Sigma}_{f,t})}{\Delta(\mathbf{y}_t, \mathbf{0}, \boldsymbol{\Sigma}_{f,t})} = \sqrt{\frac{(\mathbf{y}_t - \boldsymbol{\mu}_{f,t})^T * \boldsymbol{\Sigma}_{f,t}^{-1} * (\mathbf{y}_t - \boldsymbol{\mu}_{f,t})}{(\mathbf{y}_t)^T * \boldsymbol{\Sigma}_{f,t}^{-1} * (\mathbf{y}_t)}} \quad (4)$$

در نهایت، روش تشخیص عیب (شل شدگی) شامل دو مرحله اصلی است: آموزش و مانیتورینگ. در مرحله آموزش، داده‌های مربوط به حالت سالم (فلنج کاملاً سفت شده) جمع‌آوری و پردازش می‌شوند تا یک مدل مرجع (پایه) ایجاد شود. این مرحله شامل ثبت داده‌های ارتعاشی از شتاب‌سنج‌ها و استخراج پارامترهای مدل (ضرایب مدل پارامتری) است. سپس، بردار میانگین $\boldsymbol{\mu}_{f,t}$ و ماتریس هم‌وردایی $\boldsymbol{\Sigma}_{f,t}$ این پارامترها محاسبه می‌شوند تا به عنوان معیار مرجع برای تشخیص عیب استفاده شوند. در مرحله مانیتورینگ، داده‌های بدست‌آمده از همان شتاب‌سنج در حالت ناشناخته به‌طور مشابه پردازش می‌شوند و فواصل تا حالت سالم محاسبه می‌شوند. از طریق این دو مرحله، شاخص عیب (DI) برای هر شرایط بالقوه معیوب تعیین می‌شود. مدل پایه یک مرجع است و می‌توان از آن برای محاسبه مقادیر DI در تجزیه و تحلیل‌های بعدی برای شناسایی شرایط بالقوه معیوب استفاده کرد.

۲-۱- شاخص عیب با استفاده از مدل‌سازی پارامتری و

فاصله ماهالانوبیس

یک سیگنال ارتعاشی پایای $y[t]$ ، از یک مدل میانگین متحرک اتورگرسیو (ARMA) به شکل زیر پیروی می‌کند [۲۲]:

$$y[t] = - \sum_{i=1}^{n_a} a_i \cdot y[t-i] + \dots + \sum_{i=1}^{n_c} c_i \cdot w[t-i] + w[t], \quad (1)$$

$$w[t] \sim NID(0, \sigma_w^2)$$

که $c_i, i = 1, \dots, n_c$ به ترتیب پارامترهای AR و $a_i, i = 1, \dots, n_a$ و n_c, n_a به ترتیب مرتبه‌های AR و MA مربوطه، و $w[t]$ یک سیگنال اینویشن (باقیمانده) است که یک سری زمانی به طور مستقل توزیع شده (NID) با میانگین صفر و واریانس σ_w^2 است. مدل AR یک مورد خاص از مدل عمومی‌تر ARMA با $n_c = 0$ است. مدل‌سازی پارامتری (AR یا ARMA) شامل انتخاب مرتبه مناسب برای مدل و تخمین پارامترهای مدل است. برای انتخاب مرتبه مدل، یک جستجوی تکرار شونده گسسته با هدف به حداقل رساندن معیاری مناسب مانند RSS/SSS (جمع باقی‌مانده مربع‌ها بر مجموع مجذور سری) یا BIC (معیار اطلاعات مدل بیزی) برای مدل انجام می‌گیرد [۲۳ و ۲۴].

برای یک سیگنال ناپایای $y[t]$ ، مدل پارامتری ناپایای $TAR(n_a)$ که n_a نشان دهنده مرتبه اتورگرسیون آن است، به صورت زیر تعریف می‌شود [۲۲]:

$$y[t] = - \sum_{i=1}^{n_a} a_i[t] \cdot y[t-i] + w[t], \quad (2)$$

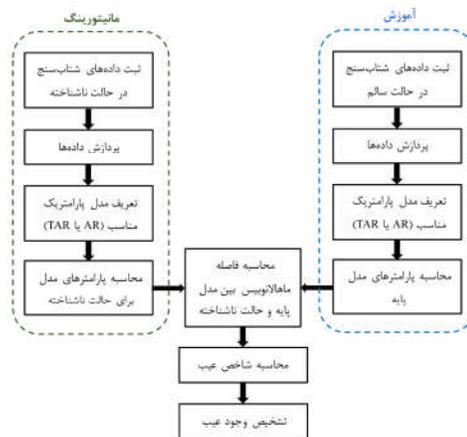
$$w[t] \sim NID(0, \sigma_w^2)$$

در عبارت فوق، t بیانگر زمان گسسته نرمالیزه شده (زمان مطلق تقسیم یا نرمالیزه شده بر پیوند نمونه برداری شده)، $y[t]$ نشان دهنده سیگنال متغیر با زمان که می‌خواهیم آن را مدل‌سازی نماییم، $w[t]$ رشته^۱ باقیمانده سفید غیر وابسته^۲ و غیر مشاهده پذیر^۳ با میانگین صفر و واریانس متغیر با زمان σ_w^2 می‌باشد. همچنین (\dots, \dots) NID نشان دهنده تابع توزیع مستقل نرمال با میانگین و واریانس نشان داده شده می‌باشد. برخلاف مدل‌های AR معمولی، که مستقل از زمان هستند، پارامترهای مدل‌های TAR و نوآوری‌های مربوطه (باقیمانده) متغیر با زمان و غیر ثابت هستند. با مشخص کردن دقیق ساختار تکامل زمانی پارامترهای $a_i[t]$ مدل TAR، آن مدل به طور کامل تعریف می‌شود. دو روش خاص در این زمینه، رویکردهای سری عملکردی (FS) و پیشین‌های صاف (SP) هستند که به ترتیب منجر به مدل‌های FS-TAR و مدل‌های SP-TAR می‌شوند. رویکرد FS-TAR ضرایب AR متغیر با زمان و واریانس نوآوری‌ها (باقیمانده) را در زیرفضاهای کاربردی خاص گسترش می‌دهد. هر زیر فضای تابع شامل مجموعه‌ای از توابع پایه است که به صورت خطی مستقل هستند و از یک خانواده مناسب مانند یک خانواده مثلثاتی یا خانواده چند جمله‌ای انتخاب می‌شوند. در این مطالعه از مدل‌سازی کلاسیک FS-TAR با توابع پایه مثلثاتی استفاده شده است. پارامترهای AR متغیر با زمان با

¹ Sequence

² Uncorrelated

³ Unobservable



شکل ۱- روند تشخیص شل‌شدگی [۲۰]



شکل ۲- چیدمان تست آزمایشگاهی

تحریک ساختار لوله فلنجی با نویز سفید گاوسی محدود در محدوده فرکانس صفر تا ۲,۴ کیلوهرتز استفاده شده است. سیگنال‌های شتاب اندازه‌گیری شده توسط شتاب‌سنج‌ها (B&K تیپ ۴۵۰۸) از ۹ نقطه، به عنوان داده‌های بدست آمده در نظر گرفته می‌شوند.

دو لوله استاندارد ۱/۲ اینچ با ضخامت دیواره ۳/۹۱ میلی‌متر (Sch. 40) با طول ۷۵۰ میلی‌متر و ۹۹۰ میلی‌متر توسط دو فلنج استاندارد ۱/۲ اینچ کلاس ۱۵۰# مطابق استاندارد ASME B16.5، به هم متصل شده‌اند. فلنج‌ها توسط چهار پیچ دو سر رزوه M14 با طول ۷۰ میلی‌متر بسته شده‌اند. جنس لوله‌ها و فلنج‌ها فولاد کربنی است. برای اندازه‌گیری پاسخ ارتعاشی سازه، ۹ شتابسنج در هر سه جهت (امتداد لوله (x)، و دو جهت عمود بر محور لوله (y) و (z)) نصب شده است. شتاب‌سنج‌ها با استفاده از موم صنعتی مخصوص به سطح لوله و فلنج‌ها متصل گردیدند تا ضمن تضمین چسبندگی کافی، امکان جداسازی بدون آسیب به سطح لوله فراهم شود. پیش از آغاز آزمایش‌ها، اتصال هر حسگر از نظر مکانیکی بررسی شده و یک سیگنال پایه (Baseline) بدون بارگذاری ثبت گردید تا از عدم وجود نویز ناشی از لق بودن یا جابجایی ناخواسته حسگرها اطمینان حاصل شود.

تجهیزات مورد استفاده دارای گواهی کالیبراسیون معتبر کارخانه بوده و پیش از شروع آزمایش صحت عملکرد آنها بررسی گردید. برای تحلیل دقیق و قابل اعتماد پاسخ‌های ارتعاشی سامانه لوله-فلنج در سناریوهای مختلف شل‌شدگی، پردازش اولیه سیگنالها و آماده‌سازی آنها برای ورود به مراحل مدل‌سازی و استخراج شاخص‌های تشخیصی، از اهمیت بالایی برخوردار است. در فرآیند گام‌به‌گام آماده‌سازی داده‌های ارتعاشی ثبت‌شده، ابتدا سیگنالهای خام خروجی از شتاب‌سنج‌ها، که به‌صورت پیوسته در طول زمان ثبت شده‌اند، مورد بازبینی اولیه قرار گرفتند. این بازبینی با هدف شناسایی نویزهای الکتریکی، اشباع شدن حسگرها یا وجود هرگونه اعوجاج در سیگنال انجام شد. پس از اطمینان از کیفیت مناسب داده‌ها، سیگنالها در تمامی آزمایش‌ها به‌صورت یکنواخت با نرخ نمونه‌برداری ۱۰ کیلوهرتز به‌صورت دیجیتال ذخیره شدند.

در گام بعد، به‌منظور حذف مؤلفه‌های فرکانسی ناخواسته که

۲-۲- شاخص عیب بر اساس تغییرات فرکانس طبیعی

شاخص عیب بر اساس تغییرات فرکانس طبیعی، روشی غیرمخرب برای شناسایی آسیب در خطوط لوله است که بر این اصل استوار است که آسیب‌هایی مانند ترک یا خوردگی، کاهش ضخامت دیواره لوله و شل‌شدگی اتصالات فلنجی فرکانس‌های طبیعی لوله را تغییر می‌دهند. با مقایسه فرکانس‌های لوله قبل و بعد از آسیب، موقعیت و شدت عیب مشخص می‌شود [۲۷]. این روش برای خطوط لوله زیرزمینی و زیردریایی بسیار کاربردی است، اما چالش‌هایی مانند حساسیت کم به آسیب‌های کوچک، تأثیر عوامل محیطی (دما، فشار و خواص سیال) و نیاز به داده‌های دقیق از حالت سالم لوله، دقت آن را محدود می‌کند. شاخص عیب بر اساس نسبت افت فرکانس طبیعی با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۲]:

$$DF = \frac{\omega_0(\text{healthy system}) - \omega(\text{defected system})}{\omega_0(\text{healthy system})} \quad (5)$$

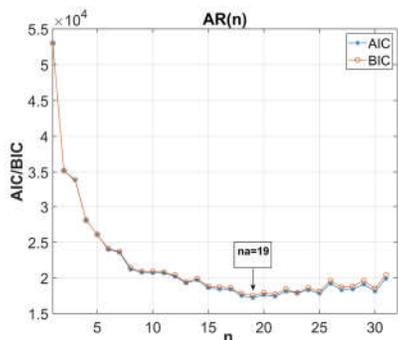
۳- تست آزمایشگاهی

در این بخش، یک سیستم لوله با اتصال فلنجی در مراحل مختلف شل‌شدگی مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش ۱-۳ سیستم تحت تحریک نیروی تصادفی گاوسی قرار گرفته و با اتخاذ مدل‌های پارامتری مستقل از زمان، شناسایی شل‌شدگی طبق رویه نشان داده شده در شکل ۱ انجام شده است. سپس شل‌شدگی با استفاده از شاخص افت فرکانس طبیعی که در بخش ۲-۲ معرفی شده است مورد شناسایی قرار گرفته و نتایج این دو روش با یکدیگر مقایسه شده است.

در بخش ۲-۳، سیستم لوله فلنجی توسط جرم متحرکی که از داخل لوله می‌گذرد تحریک می‌شود. از آنجایی که سیستم متغیر با زمان است، از مدل‌های پارامتری متغیر با زمان برای شناسایی شل‌شدگی استفاده شده است. در انتهای این بخش نیز نتایج شناسایی شل‌شدگی با استفاده از مدل‌های پارامتری و تغییرات فرکانس طبیعی مورد مقایسه قرار گرفته است.

۳-۱- استفاده از تحریک‌کننده ارتعاشی (سیستم پایا)

همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، یک تحریک‌کننده ارتعاشی آزمایشگاهی (تحریک‌کننده ارتعاشی B&K تیپ ۴۸۰۹) برای



شکل ۳- انتخاب مرتبه برای مدل‌های AR(n) با استفاده از منحنی‌های AIC/BIC

برای مورد کاملاً سفت شده (سالم)، پارامترهای مدل AR مربوط به چهار مجموعه سیگنال به دست آمده (۴۰ بخش سیگنال با طول ۱ ثانیه) از یک شتاب‌سنج برای تعیین مدل پایه (مرجع) استفاده می‌شوند. برای این منظور، پس از تولید یک مدل AR مربوط به هر بخش از سیگنال از شتاب‌سنج‌ها، پارامترهای AR محاسبه می‌شود. با استفاده از ۴۰ مجموعه مدل محاسبه شده، یک مدل میانگین به دست می‌آید و به عنوان مدل پایه برای هر شتاب‌سنج در نظر گرفته می‌شود. برای سیگنال‌های ارتعاشی ثبت شده از موارد شل، ۱۰ بخش از داده‌های به دست آمده مشابه فرآیند فوق پردازش می‌شوند و برای هر ۱۰ بخش پارامترهای مدل AR محاسبه می‌گردد. پس از به دست آوردن پارامترهای مدل AR برای این موارد، فاصله ماهالانوبیس بین حالت شل (۱۰ دسته پارامتر) و حالت کاملاً سفت (۴۰ دسته پارامتر) تعیین می‌شود. سپس مقادیر DI مطابق معادله (۴) محاسبه می‌شود. برای مقایسه مقادیر DI محاسبه شده برای حالت‌های شل با حالت کاملاً سفت، و اعتبارسنجی دقت روش پیشنهادی تشخیص شل‌شدگی، مقادیر DI برای حالت کاملاً سفت شده دیگری نیز محاسبه شده و به همراه مقادیر DI برای حالت‌های شل، در شکل ۴ نشان داده شده‌اند. به منظور افزایش اعتبار نتایج، تمامی تست‌های آزمایشگاهی برای هر مرحله شل‌شدگی ۱۰ مرتبه تکرار شدند و میانگین و انحراف معیار شاخص‌های به دست آمده محاسبه گردید. نتایج در قالب نمودارهای میله‌ای به همراه میله‌های خطا (Error bars) در شکل ۴ نشان داده شده است تا میزان پراکندگی داده‌ها مشخص گردد. همچنین برای بررسی معناداری آماری تفاوت بین حالت سالم و مراحل مختلف شل‌شدگی، آزمون تحلیل واریانس (ANOVA^۳) یک‌طرفه انجام شد. مقدار به دست آمده برای p-value برابر با 7.76×10^{-69} بوده است که نشان می‌دهد تفاوت مشاهده شده بین حالت‌ها از نظر آماری به شدت معنادار است ($p < 0.05$). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که شاخص DI پیشنهادی، توانایی بالایی در تفکیک شرایط سالم و معیوب دارد و قابلیت اعتماد آن در تشخیص زود هنگام شل‌شدگی اتصالات فلنجی به اثبات می‌رسد.

ممکن است ناشی از اغتشاشات محیطی یا پاسخ‌های خارج از باند مؤثر تحریک باشند، از فیلتر پایین‌گذر دیجیتال استفاده شد. با توجه به باند فرکانسی تحریک (حداکثر ۲,۴ کیلوهرتز) و وجود محتوای مفید ارتعاشی تا حدود ۳ کیلوهرتز، فیلتر مناسب با فرکانس قطع در حدود ۳,۵ کیلوهرتز انتخاب شد تا از اعوجاج^۱ و همان‌پنداری^۲ جلوگیری شود. پس از فیلترگذاری، سیگنال‌های زمانی نرمال‌سازی شدند. نرمال‌سازی با هدف حذف اثر مقیاس‌پذیری بین حسگرها و همچنین کاهش وابستگی شاخص‌های استخراجی به دامنه مطلق پاسخ‌ها انجام شد.

برای اعمال سناریوهای مختلف شل‌شدگی، ابتدا پیچ‌ها تا مقدار گشتاور مرجع مشخص شده کاملاً سفت شدند و سپس با استفاده از آچار دارای گشتاورسنج استاندارد درصدهای مختلف شل‌شدگی به صورت کنترل شده اعمال گردید. این کار موجب شد که مقدار شل‌شدگی به طور دقیق و تکرارپذیر کنترل شود.

جدول ۱- مراحل شل‌شدگی

شماره مرحله	تعداد پیچ شل شده	نسبت شل‌شدگی
۱	صفر (سالم)	0%
۲	۱	20%
۳	۱	50%
۴	۲	20%, 20%
۵	۲	50%, 50%
۶	۱	100%
۷	۲	100%, 20%
۸	۲	100%, 50%

شناسایی سیستم با استفاده از تخمین مدل‌های AR برای طبقه بندی سیگنال‌های شتاب ثبت شده انجام شده است. همانطور که در بخش ۱-۲ توضیح داده شد، شاخص عیب با توجه به فاصله ماهالانوبیس بین مدل‌های AR برای مقایسه دو مدل AR در نظر گرفته شده تا معیاری برای تعیین فاصله بین مدل‌های برآورد شده به دست آید. برای سیگنال ارتعاشی ثبت شده از هر شتاب‌سنج در حالت‌های کاملاً سفت و شل شده، سیگنال با طول ۱۰ ثانیه به ۱۰ بخش با طول ۱ ثانیه تقسیم شده و سپس فرآیند نرمال‌سازی و فیلتر کردن روی هر بخش انجام شده است. با استفاده از منحنی‌های AIC/BIC مرتبه مدل AR، $n = 19$ تعیین شده است. این مرتبه با یک فلش در منحنی‌های AIC/BIC در شکل ۳ نشان داده شده است.

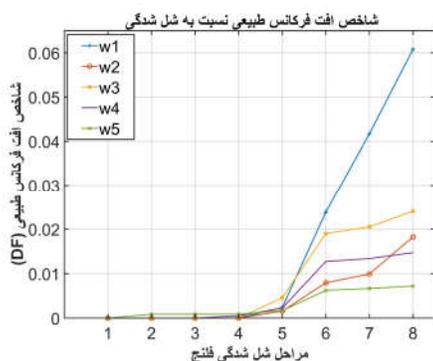
¹ Distortion

² Aliasing

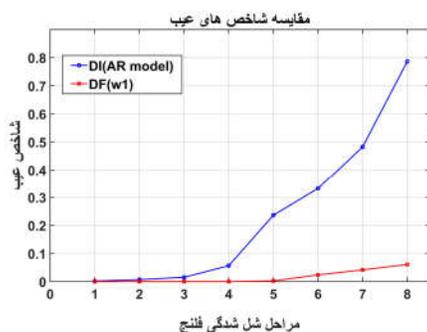
³ Analysis of Variance

شاخص افت فرکانس طبیعی بر اساس اطلاعات جدول ۲ محاسبه شده و در شکل ۶ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل نیز دیده می‌شود شاخص افت فرکانس طبیعی در مراحل اولیه شل‌شدگی صفر و یا بسیار پایین می‌باشد و از مرحله ۶ به بعد نتایج مشخص و قابل استنادی ارائه می‌نماید. همچنین، مطابق انتظار، شاخص بدست آمده از میزان افت اولین فرکانس طبیعی نتایج بهتری ارائه می‌دهد.

مقایسه نتایج شناسایی شل‌شدگی سیستم لوله فلنچ‌دار که با تحریک‌کننده ارتعاشی تحریک شده است، با استفاده از مدل‌های پارامتری و تغییرات فرکانس طبیعی در شکل ۷ نشان شده است. بر اساس این نتایج، شاخص عیب استخراج شده از مدل‌های پارامتری، در مقایسه با شاخص افت فرکانس طبیعی، توانایی بیشتری در شناسایی سریع‌تر و قابل اطمینان‌تر عیوب دارد و عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد.



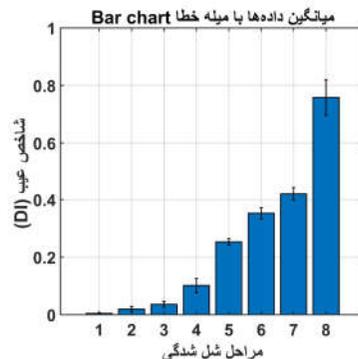
شکل ۶- شاخص افت فرکانس طبیعی برای ۸ مرحله شل‌شدگی مطابق جدول ۱ (۵ فرکانس طبیعی اول)



شکل ۷- شاخص عیب استخراج شده از مدل‌های پارامتری، در مقایسه با شاخص افت فرکانس طبیعی

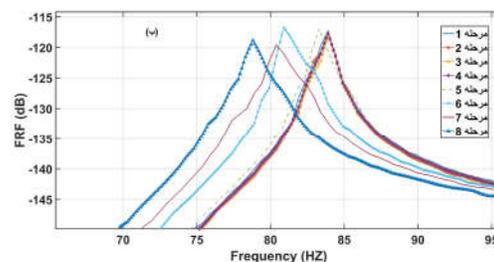
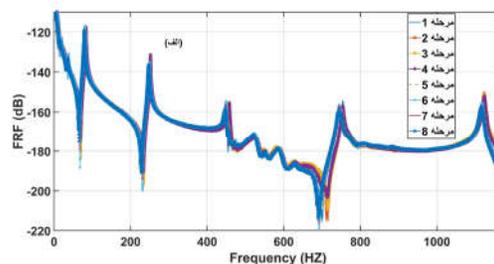
۳-۲- سیستم ناپایا (تحریک از طریق جرم متحرک)

نتایج ارائه شده در بخش ۳-۱ نشان می‌دهد که مدل‌های پارامتری عملکرد خوبی برای تشخیص شل‌شدن پیچ فلنچ دارند، اما استفاده از تحریک‌کننده ارتعاشی برای تحریک سیستم لوله کشی عملی نیست و فقط در آزمایشگاه‌ها قابل استفاده است. بنابراین، در اینجا یک جرم متحرک برای تحریک لوله فلنچی که در شکل ۸ نشان داده شده، استفاده شده است. یک جرم متحرک $m=0.8\text{Kg}$ با سرعت ثابت $v=0.4\text{m/s}$ (دور موتور: 10rpm) در داخل لوله حرکت می‌کند. تحریک سیستم با استفاده از جرم متحرک باعث می‌شود تا مشخصات



شکل ۴- شاخص عیب شناسایی شده با استفاده از مدل AR

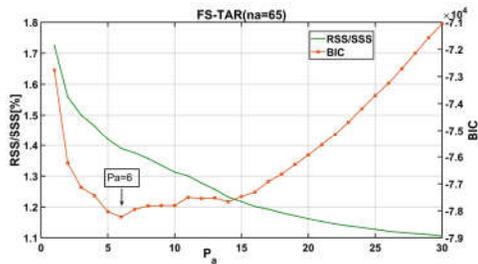
همانطور که در بخش ۲-۲ نیز توضیح داده شده است، استفاده از شاخص افت فرکانس طبیعی نیز می‌تواند معیار مناسبی برای تشخیص عیوبی مثل شل‌شدگی فلنچ در خطوط لوله باشد. فرکانس‌های طبیعی سیستم لوله با اتصال فلنجی برای ۸ مرحله شل‌شدگی که در جدول ۱ ارائه شده است استخراج شده و نمودار پاسخ فرکانسی بدست آمده از یکی از حسگرها در شکل ۵ نشان داده شده است. در جدول ۲ نیز ۵ فرکانس طبیعی اول سیستم برای ۸ مرحله شل‌شدگی ارائه شده است.



شکل ۵- پاسخ فرکانسی بدست آمده برای ۸ مرحله شل‌شدگی، الف- برای ۵ فرکانس طبیعی اول ب- بزرگنمایی اولین فرکانس طبیعی

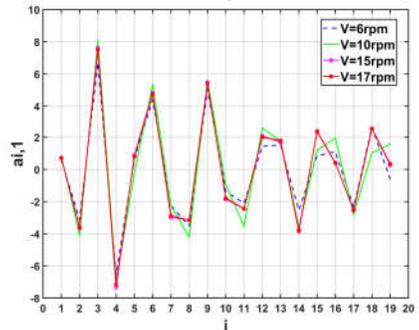
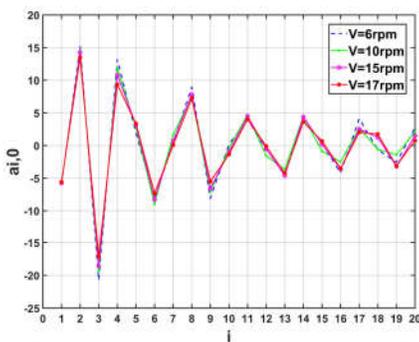
جدول ۲- فرکانس‌های طبیعی سیستم برای ۸ مرحله شل‌شدگی

مرحله شل‌شدگی	فرکانس طبیعی (هرتز)			
	اول	دوم	سوم	چهارم
۱	۸۲/۹۲	۲۵۱/۹۱	۴۵۷/۸۴	۷۵۴/۴۳
۲	۸۲/۹۲	۲۵۱/۹۱	۴۵۷/۸۴	۷۵۴/۴۳
۳	۸۲/۹۲	۲۵۱/۹۱	۴۵۷/۸۴	۷۵۴/۴۳
۴	۸۲/۹۲	۲۵۱/۹۱	۴۵۷/۸۴	۷۵۴/۴۳
۵	۸۳/۷۴	۲۵۱/۵۳	۴۵۵/۷۷	۷۵۲/۷۰
۶	۸۱/۹۱	۲۴۹/۹۰	۴۴۹/۱۱	۷۴۴/۸۶
۷	۸۰/۴۰	۲۴۹/۴۲	۴۴۸/۴۴	۷۴۴/۳۴
۸	۷۸/۸۱	۲۴۷/۳۳	۴۴۶/۸۰	۷۴۳/۳۱



شکل ۹- انتخاب مرتبه p_a برای مدل $TAR(n_a = 65, p_a)$ [۲۰]

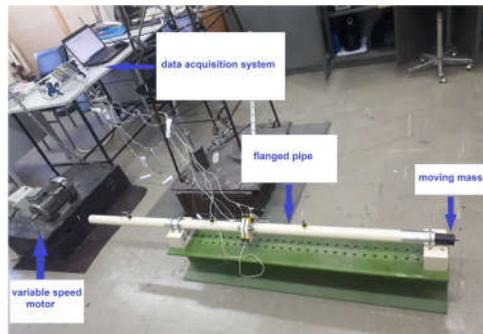
تست‌های تحریک با جرم متحرک، با چهار سرعت مخلف انجام شده و مقادیر تعدادی از ضرایب مدل FS-TAR(65)6 برای هر چهار سرعت متفاوت در شکل ۱۰ ارائه شده‌اند. مقایسه این مقادیر نشان می‌دهد که تغییر سرعت عبور پیگ تأثیر معناداری بر ضرایب استخراج شده نداشته است. نوسانات موجود در ضرایب، در محدوده مجاز نوسانات طبیعی فرایند مدل‌سازی قرار داشته و هیچ روند مشخصی مبنی بر وابستگی ضرایب به سرعت تحریک مشاهده نمی‌شود. این نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی مبتنی بر مدل FS-TAR از پایداری مناسبی در برابر تغییرات سرعت جرم متحرک برخوردار است. به عبارت دیگر، ضرایب استخراج شده می‌توانند به عنوان بردارهای ویژگی قابل اعتماد و مستقل از نرخ تحریک، در فرآیندهای تشخیص وضعیت و تحلیل سلامت اتصال فلنجی مورد استفاده قرار گیرند.



شکل ۱۰- ضرایب مدل FS-TAR(65)6 استخراج شده از پاسخ سازه تحت تحریک جرم متحرک با سرعت‌های متفاوت (بعنوان نمونه تعداد ۲۰ ضریب اول $a_{i,0}$ و $a_{i,1}$ نشان داده شده است)

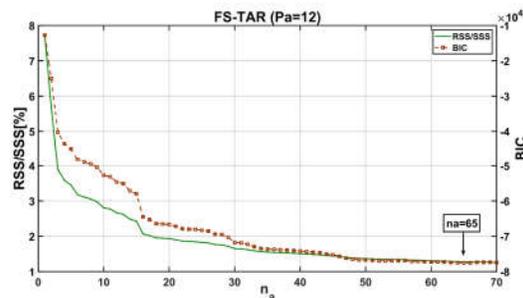
مطابق روش پیشنهادی در بخش 2-1، برای مرحله آموزش مربوط به حالت کاملاً سفت شده (سالم)، مجموعه‌ای از داده‌های به دست آمده از شتاب سنج‌ها برای مشخص کردن یک مدل پایه پردازش شده است.

فیزیکی سیستم به صورت دینامیکی و متناسب با زمان تغییر کند، بنابراین برای مدل‌سازی سیگنال‌های متغیر با زمان و محاسبه DI برای شناسایی شل شدگی، از مدل‌های TAR استفاده می‌شود.

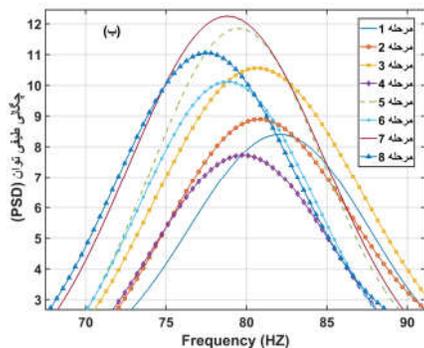


شکل ۸- چیدمان تست آزمایشگاهی (تحریک از طریق جرم متحرک)

منحنی‌های RSS/SSS و BIC برای انتخاب مرتبه مدل (n_a) و مرتبه پایه عملکردی (p_a) استفاده می‌شوند. این کار با به حداقل رساندن RSS/SSS و BIC برای مدل‌های FS-TAR با $n_a = 1, 2, \dots, 70$ و $p_a = 2, 3, \dots, 30$ انجام می‌شود. تخمین پارامتر با به حداقل رساندن خطای پیش‌بینی با روش حداقل مربعات انجام می‌شود. پایه فوریه با فرکانس‌های برابر با ۰.۰۱ اولین فرکانس طبیعی سازه لوله فلنجی $\alpha_1 = 0.23 \text{ Hz}$ ، برای توابع پایه انتخاب شده است. منحنی‌های RSS/SSS و BIC برای مدل‌های FS-TAR با فرض $p_a = 12$ در شکل ۹ نشان داده شده است، برای $n_a = 65$ به حداقل رسیده است. برای چندین ابعاد پایه عملکردی، RSS/SSS و BIC نیز در شکل ۱۰ بررسی و ترسیم شده‌اند. با افزایش ابعاد پایه، RSS/SSS کاهش می‌یابد، اما به طور همزمان BIC به دلیل افزایش تعداد پارامترهای مدل افزایش می‌یابد. ابعاد پایه $p_a = 6$ با ایجاد توازن بین تعداد پارامترهای مورد نیاز و دقت مدل تعیین شده و FS-TAR(65)6 به عنوان یک مدل قابل قبول انتخاب گردیده است.

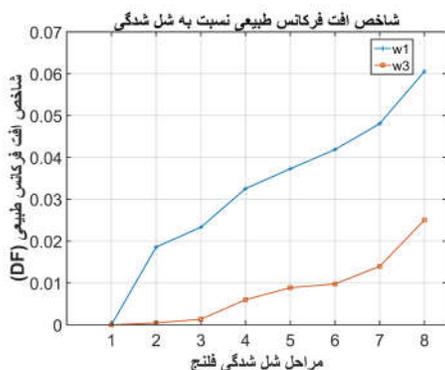


شکل ۸- انتخاب مرتبه n_a برای مدل $TAR(n_a, p_a = 12)$ [۲۰]



شکل ۱۲- نمودارهای چگالی طیفی توان برای ۸ مرحله شل‌شدگی، الف- برای محدوده ۵ فرکانس طبیعی اول ب- بزرگنمایی اولین فرکانس طبیعی

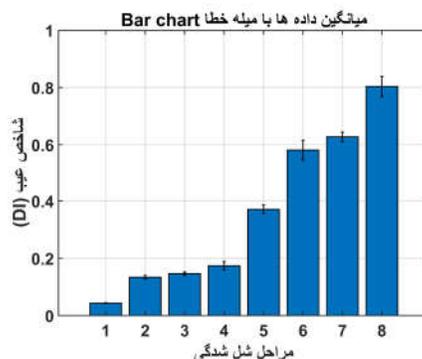
شاخص افت فرکانس طبیعی محاسبه شده برای فرکانس طبیعی اول و سوم لوله با استفاده از ارتعاشات ثبت در زمان عبور جرم متحرک از محل فلنج در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مطابق این شکل، شاخص افت فرکانس طبیعی به ویژه برای فرکانس طبیعی اول، قابلیت شناسایی شل‌شدگی حتی در مراحل اولیه را نیز دارد.



شکل ۱۳- شاخص افت فرکانس طبیعی برای ۸ مرحله شل‌شدگی (فرکانس طبیعی اول و سوم)

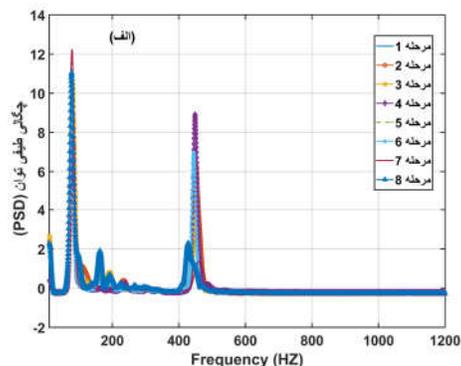
نتایج شناسایی شل‌شدگی در سیستم لوله‌ای با اتصال فلنج‌دار که توسط جرم متحرک داخلی تحریک شده است، با استفاده از مدل‌های پارامتری و تغییرات فرکانس طبیعی در شکل ۱۴ مقایسه شده‌اند. بر اساس این نتایج، هر دو شاخص، گزارش‌های قابل قبولی از وجود شل‌شدگی ارائه می‌دهند. با این حال، شاخص عیب استخراج شده از مدل‌های پارامتری، در مقایسه با شاخص کاهش فرکانس طبیعی، از دقت و قابلیت اطمینان بیشتری در شناسایی عیوب برخوردار است و عملکرد بهتری را نشان می‌دهد.

نتایج تشخیص شل‌شدگی برای همه موارد مراحل شل‌شدگی مطابق جدول ۱، در شکل ۱۱ نشان داده شده است. در این بخش نیز برای بررسی معناداری آماری تفاوت بین حالت سالم و مراحل مختلف شل‌شدگی، آزمون تحلیل واریانس (ANOVA) یک‌طرفه انجام شد. مقدار به‌دست‌آمده برای p-value برابر با 1.04×10^{-61} است که نشان می‌دهد تفاوت مشاهده شده بین حالت‌ها از نظر آماری کاملاً معنادار است و شاخص DI پیشنهادی قادر به تفکیک دقیق شرایط سالم و معیوب بوده و معیاری قابل اعتماد برای تشخیص زود هنگام شل‌شدگی در اتصالات فلنجی می‌باشد.



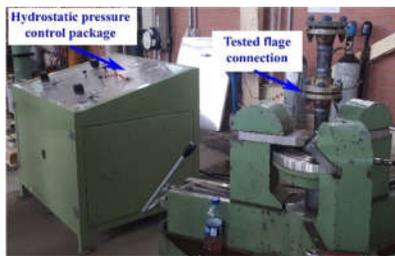
شکل ۱۱- شاخص عیب شناسایی شده برای حالت‌های شل‌شدگی مطابق جدول ۱ (با استفاده از مدل TAR)

مشابه بخش ۳-۱، در این قسمت نیز تحلیل فرکانسی سیستم لوله‌ای با اتصال فلنجی برای ۸ حالت مختلف شل‌شدگی انجام شده است. در فرآیند عیب‌یابی سازه‌ها با استفاده از تحلیل ارتعاشات ناشی از تحریک توسط جرم متحرک، شاخص کاهش فرکانس طبیعی در لحظه عبور جرم متحرک از محل عیب، بیشترین کارایی را نشان می‌دهد [2]. با توجه به این نکته، نمودار چگالی طیفی توان (PSD) ارتعاشات ثبت‌شده توسط یکی از حسگرها در زمان عبور جرم متحرک از محل فلنج، در شکل ۱۲ ارائه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، تنها مودهای اول و سوم لوله به‌صورت واضح تحریک شده‌اند، که با توجه به قرار گرفتن فلنج وسط لوله و بین دو تکیه‌گاه، مطابق انتظار می‌باشد.



جدول ۳- نتایج تست نشستی برای مراحل شل‌شدگی جدول ۱

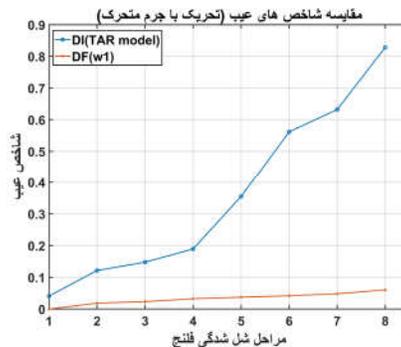
مراحل شل‌شدگی مطابق جدول ۱	نتیجه تست نشستی تحت حداکثر فشار مجاز (20bar)
۱	بدون نشستی
۲	بدون نشستی
۳	بدون نشستی
۴	بدون نشستی
۵	بدون نشستی
۶	بدون نشستی
۷	شروع نشستی بصورت قطره
۸	نشستی شدید



شکل ۱۵- چیدمان تست نشستی اتصال فلنجی

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، استفاده از ارتعاشات ناشی از حرکت جرم متحرک (پیگ) برای تشخیص زودهنگام شل‌شدگی پیچ‌های فلنجی در خطوط لوله صنعتی مورد بررسی قرار گرفت. روش پارامتری مبتنی بر مدل اتورگرسیو توانست به‌صورت دقیق کاهش سفتی محلی ناشی از شل‌شدگی را حتی در مراحل اولیه تشخیص دهد. با استخراج ضرایب مدل به‌عنوان ویژگی‌های حساس به آسیب و بهره‌گیری از فاصله ماهالانوبیس، این روش دقت بالایی در شناسایی عیوب قبل از بروز نشستی ارائه کرد. برای شناسایی شل‌شدگی، از روش‌های مدل‌های پارامتری و تحلیل فرکانسی براساس شاخص افت فرکانسهای طبیعی استفاده شد و نتایج آنها با هم مقایسه گردید. روش مبتنی بر مدل‌های پارامتری نسبت به روش‌های فرکانس‌محور مزایای قابل توجهی دارد. این روش حساسیت بیشتری به تغییرات موضعی ناشی از عیوب در اتصالات فلنجی دارد، در حالی که روش‌های فرکانس‌محور فقط در صورت ایجاد تغییرات قابل اندازه‌گیری در فرکانس‌های طبیعی سیستم قادر به تشخیص آسیب هستند. علاوه بر این، روش پارامتری مقاومت بیشتری نسبت به نویز محیطی دارد، زیرا تغییرات فرکانس‌های طبیعی معمولاً تحت تأثیر نویز خارجی یا عوامل دیگر مانند تغییرات دما قرار می‌گیرد. با این حال، نتایج نشان داد که شاخص افت فرکانس طبیعی تا حدود حالت شل‌شدگی ۵ تغییر محسوسی ندارد و بنابراین حساسیت روش فرکانس‌محور در تشخیص عیوب کوچک محدود است. این موضوع حد تشخیص عملی روش فرکانس‌محور را مشخص می‌سازد و بیانگر آن است که تنها در سطوح بالاتر شل‌شدگی می‌توان انتظار تغییر قابل توجه در فرکانس‌های طبیعی داشت. در مقابل، روش پارامتری حتی در همان سطوح پایین‌تر شل‌شدگی (زیر حالت ۵) نیز قادر به آشکار سازی تغییرات موضعی بوده و از این نظر برتری محسوسی نسبت به روش فرکانس‌محور دارد. همچنین، نتایج نشان داد که استفاده از جرم متحرک (پیگ) به‌جای تحریک‌کننده ارتعاشی، هم در روش مدل‌های پارامتری و هم در



شکل ۱۴- شاخص عیب استخراج‌شده از مدل‌های پارامتری، در مقایسه با شاخص افت فرکانس طبیعی (تحریک لوله با جرم متحرک داخلی)

۴- تست نشستی فلنج

روش‌های شناسایی شل‌شدگی فلنج‌ها، به‌ویژه در فلنج‌های به‌کاررفته در خطوط لوله صنعتی، زمانی دارای ارزش و اهمیت واقعی خواهند بود که امکان تشخیص وضعیت شل‌شدگی قبل از وقوع هرگونه نشستی از اتصال فلنجی فراهم شود. در واقع، اگر بتوان وضعیت کاهش پیش‌بار پیچ‌ها را پیش از رسیدن به مرحله نشستی شناسایی کرد، می‌توان از بسیاری از خسارات و توقف‌های ناخواسته در فرایند جلوگیری نمود. بر همین اساس، در این بخش و با هدف ارزیابی عملی کارایی روش پیشنهادی برای شناسایی شل‌شدگی فلنج، یک تست نشستی بر روی یک اتصال فلنجی مشابه با سیستم نمایش داده‌شده در شکل ۱ طراحی و اجرا گردید.

همان‌گونه که در شکل ۱۵ نشان داده شده است، اتصال فلنجی مورد آزمایش توسط دستگاه اختصاصی تست نشستی تحت فشار داخلی 20bar قرار گرفت؛ این مقدار حداکثر فشار مجاز برای اتصال فلنجی 1/2 اینچ و کلاس فشاری #150 در شرایط دمایی استاندارد محسوب می‌شود. در گام نخست، هر چهار پیچ اتصال فلنجی با بیشترین مقدار گشتاور مجاز سفت شدند که در این وضعیت، مطابق انتظار هیچ‌گونه نشستی در سیستم مشاهده نگردید.

در ادامه، به‌منظور شبیه‌سازی شرایط شل‌شدگی، مراحل مختلف کاهش گشتاور پیچ‌ها طبق آنچه در جدول ۱ آمده است، به‌صورت تدریجی بر روی اتصال اعمال شد و پس از هر مرحله، تست نشستی مجدداً انجام گرفت. نتایج نشان داد که در حالت‌های ۱ تا ۶ هیچ نشستی قابل مشاهده نبود و آغاز نشستی تنها از حالت ۷ به بعد رخ داد. داده‌های مربوط به این آزمایش در جدول ۳ ارائه شده است.

جمع‌بندی این آزمایش‌ها بیانگر آن است که روش پیشنهادی قادر است پیش از شروع نشستی واقعی در اتصال، وقوع شل‌شدگی را شناسایی کند. از این‌رو می‌توان نتیجه گرفت که این روش از دیدگاه کاربرد صنعتی بسیار ارزشمند و دارای قابلیت استفاده عملی در پایش سلامت اتصالات فلنجی است.

- روش تحلیل فرکانسی، منجر به شناسایی سریع‌تر و مطمئن‌تر شل‌شدگی می‌شود.
- این مطالعه نشان داد که ادغام مدل‌های پارامتری با داده‌های عملیاتی پیگ، نه تنها یک جایگزین کم‌هزینه برای روش‌های آزمایشگاهی است، بلکه به‌عنوان ابزاری پیشگیرانه در مدیریت سلامت خطوط لوله عمل می‌کند. برخلاف نتیجه‌گیرهای توصیفی صرف، یافته‌های آماری این پژوهش (از جمله آزمون ANOVA یکطرفه با p-value بسیار پایین) اعتبار نتایج را به‌طور علمی تأیید کرده و نشان داد که روش پیشنهادی قادر به تفکیک معنادار بین حالت سالم و حالت‌های مختلف شل‌شدگی است. از منظر کاربرد صنعتی، این روش می‌تواند در سیستم‌های پایش درون‌خطی خطوط لوله به‌کار گرفته شود و بدون نیاز به توقف عملیات، به‌عنوان بخشی از فرآیند استاندارد حرکت پیگ، سلامت اتصالات را بررسی کند. این موضوع مزیت عملیاتی بزرگی برای صنایع نفت و گاز محسوب می‌شود. برای توسعه آتی، پیشنهاد می‌شود این رویکرد علاوه بر شل‌شدگی، برای شناسایی سایر عیوب نظیر ترک و خوردگی نیز گسترش یابد. همچنین، ادغام روش حاضر با الگوریتم‌های یادگیری ماشین پیشرفته و شبکه‌های پایش هوشمند می‌تواند دقت و سرعت شناسایی عیوب را افزایش دهد. اجرای آزمایش‌های میدانی در خطوط لوله واقعی و بررسی اثر پارامترهایی مانند سرعت پیگ، جنس لوله و شرایط عملیاتی نیز از دیگر مسیرهای پیشنهادی برای پژوهش‌های آینده است.
- ۶- مراجع**
- [1] Razi P, Esmacel RA, Taheri F. Improvement of a vibration-based damage detection approach for health monitoring of bolted flange joints in pipelines. *Struct Health Monit.* 2013;12(3):207-24.
- [2] Yoon HI, Son IS. Dynamic behavior of cracked simply supported pipe conveying fluid with moving mass. *J Sound Vib.* 2006;292(3-5):941-53.
- [3] Argatov I, Sevostianov I. Health monitoring of bolted joints via electrical conductivity measurements. *Int J Eng Sci.* 2010;48(10):874-87.
- [4] Ritdumrongkul S, Fujino Y. Identification of the location and level of damage in multiple-bolted-joint structures by PZT actuator-sensors. *J Struct Eng.* 2006;132(2):304-11.
- [5] He K, Zhu WD. Bolt loosening detection using nonlinear vibrational spectroscopy. *Struct Health Monit.* 2014;13(3):341-52.
- [6] Chelimilla N, Chinthapenta V, Kali N, Korla S. Review on recent advances in structural health monitoring paradigm for looseness detection in bolted assemblies. *Struct Health Monit.* 2023;0(0). Online ahead of print.
- [7] Jena SP, Parhi DR. Parametric study on the response of cracked structure subjected to moving mass. *J Vib Eng Technol.* 2017;5(1):11-9.
- [8] Sadeghi MH, Chitsaz S, Etefagh MM. Effect of PIG's physical parameters on dynamic behavior of above ground pipeline in pigging operation. *Mech Syst Signal Process.* 2019;132:692-720.
- [9] Junker G. New criteria for self-loosening of fasteners under vibration. *SAE Trans.* 1969;78:314-35.
- [10] Groper M. Microslip and macroslip in bolted joints. *Exp Mech.* 1985;25:171-5.
- [11] Pai NG, Hess DP. Experimental study of loosening of threaded fasteners due to dynamic shear loads. *J Sound Vib.* 2001;253(3):585-602.
- [12] Esmacel RA, Briand J, Taheri F. Computational simulation and experimental verification of a new vibration-based structural health monitoring approach using piezoelectric sensors. *Struct Health Monit.* 2012;11(2):237-50.
- [13] He K, Zhu WD. Detecting loosening of bolted connections in a pipeline using changes in natural frequencies. *J Vib Acoust.* 2014;136(3):034502.
- [14] Pathirage CSN, Li J, Li L, Hao H, Liu C, Ni P. Structural damage identification based on autoencoder neural networks and deep learning. *Eng Struct.* 2018;172:13-28.
- [15] Nichols JM, Trickey ST, Seaver M, Motley SR, Eisner ED. Using ambient vibrations to detect loosening of a composite-to-metal bolted joint in the presence of strong temperature fluctuations. *J Vib Acoust.* 2007;129(6):710-7.
- [16] Milanese A, Marzocca P, Nichols JM, Seaver M, Trickey ST. Modeling and detection of joint loosening using output-only broad-band vibration data. *Struct Health Monit.* 2008;7(4):309-28.
- [17] Gharibkhanian A, et al. Comparative study of EMA and OMA for bolt loosening detection in steel structures. *J Vib Control.* 2023;29(7-8):1234-45.
- [۱۸] میثمی، ف، معاونیان م، افشارفرد، ع، پیشبین الف، بررسی تحلیلی و آزمایشگاهی رفتار غیرخطی اتصالات فلنجی تحت بارگذاری طولی و خمشی. *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و سازه‌ها دانشگاه شهردود.* ۱۳۹۵، د. ۶، ش. ۳، 43-54.
- [۱۹] یادآور نیکروش م، گودرزی م، تشخیص تجربی و عددی شلشدگی اتصالات پیچی فلنجی به کمک روش مدولاسیون ویبروآکوستیک. *نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر.* ۱۴۰۰، د. ۵۳، ش. ۲، ۱۳۳۱-۱۳۴۴.
- [20] Bonab BT, Sadeghi MH, Etefagh MM. Bolt Looseness Detection in Flanged Pipes using Parametric Modeling. *J Pipeline Syst Eng Pract.* 2025;16(1):04024067.
- [21] Avendaño-Valencia LD, Fassois SD. Stationary and non-stationary random vibration modeling and analysis for an operating wind turbine. *Mech Syst Signal Process.* 2014;47:263-85.
- [22] Poulimenos A, Fassois SD. Parametric time-domain methods for non-stationary random vibration modeling and analysis: A critical survey and comparison. *Mech Syst Signal Process.* 2006;20(4):763-816.
- [23] Manolakis DG, Ingle VK, Kogon SM. Statistical and adaptive signal processing: spectral estimation, signal modeling, adaptive filtering and array processing. Boston: Artech House; 2005.
- [24] Fassois SD, Sakellariou JS. Statistical time series methods for structural health monitoring. In: Boller C, Chang F, Fujino Y, editors. *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*. Chichester: John Wiley & Sons; 2009. 443-72.
- [25] Avendaño-Valencia L, Spiridonakos M, Fassois S. In-operation identification of a wind turbine structure via non-stationary parametric models. In: *Proceedings of the 8th International Workshop on Structural Health Monitoring*; 2011; Stanford, CA, USA. Vol. 2; 2011. 2611-8.
- [26] Liu JH, Corbita NT Jr, Lee RM, Wang CC. Wind turbine anomaly detection using Mahalanobis distance and SCADA alarm data. *Appl Sci (Basel).* 2022;12(17):8661.
- [۲۷] صالحپور اسکویی ف، همایون صادقی م، عرب‌ملکی و، توسعه مدل جدید برای عیب‌یابی لوله‌های جدار ضخیم ترک‌دار. پنجمین کنفرانس تخصصی پایش وضعیت و عیب‌یابی، دانشکده نفت آبادان، ایران ۱۳۸۹.