



جستجوی ترک در لوله‌های تحت فشار به کمک روش شاهین هریس

افشین فتحی^۱، حسام مکوندی^{۲*}

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک، واحد اهواز، دانشگاه آزاد اسلامی، اهواز، ایران

۲. استادیار گروه مکترونیک، واحد آبادان، دانشگاه آزاد اسلامی، آبادان، ایران

*نویسنده مسئول: hesam.makvandi@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۷

چکیده

شکست‌های ناگهانی در سازه‌ها یکی از نتایج وجود عیوب در قطعات است که آسیب‌های فراوان اقتصادی و جانی را منجر شده است. از آنجا که ایجاد و رشد ترک‌ها می‌تواند منجر به شکست در قطعات گردد لذا محققین بسیاری به بررسی روش‌هایی جهت تشخیص وجود ترک در سازه نموده‌اند. با توجه به کاربرد گسترده لوله‌ها در صنایع مختلف، بازرسی لوله‌ها یکی از مسائل بسیار مهم در صنعت است. هدف از انجام این پژوهش، ارائه روشی جهت تشخیص ترک (عمق و مکان ترک) در لوله‌های تحت فشار به کمک تحلیل مودال می‌باشد. در این‌جا از روش کوادراتور دیفرانسیلی به منظور حل مسئله استفاده شده است. به این منظور ابتدا با محاسبه فرکانس‌های طبیعی ارتعاشات سازه معیوب، تاثیر خصوصیات ترک بر ارتعاشات سازه مورد بررسی قرار گرفته و پس از آن با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی شاهین هریس، به جستجوی محل و عمق ترک با استفاده از فرکانس‌های ارتعاشات لوله پرداخته می‌شود. بررسی نتایج بدست آمده برای لوله‌های ترک‌دار تحت فشار سیال موید صحت و دقت مناسب روش ارائه شده برای حل مستقیم و معکوس می‌باشد.

کلمات کلیدی: ترک، فرکانس‌های طبیعی، لوله تحت فشار، الگوریتم شاهین هریس.

مقدمه

لوله‌ها از اجزا پرکاربرد در سازه‌های صنعتی می‌باشند. در صنایع مختلف از لوله‌ها عموماً به منظور انتقال سیالات استفاده می‌گردد. لوله‌ها نیز مشابه با سایر سازه‌ها مستعد ایجاد انواع نواقص و آسیب‌ها از قبیل ترک، خوردگی و فرسایش هستند که موجب تغییر رفتار سازه در طول عمر کاری آن می‌گردد. از این‌رو بررسی تاثیر ترک بر رفتار لوله‌ها از گذشته مورد توجه محققین بسیاری قرار گرفته است. لی و همکاران [۱] ارتعاشات آزاد لوله حامل سیال را با در نظر گرفتن کوپل ارتعاشات محوری، خمشی و پیچشی مورد تحلیل قرار دادند. آنها در بررسی خویش از روش ماتریس انتقال استفاده نموده و تاثیر سرعت سیال روی فرکانس طبیعی را برای لوله‌های مختلف بررسی نمودند. یو و همکاران [۲] با استفاده از روش سیمپسون تطبیقی به بررسی ارتعاشات لوله‌های ترک‌دار با ترک‌های سطحی مایل پرداختند. آنها به بررسی تاثیر زاویه ترک بر رفتار ارتعاشی ترک پرداختند و به این منظور تاثیرات نیروهای محوری، برشی و گشتاورهای خمشی در محل ترک را در نظر گرفتند. آنها همچنین با استفاده از فرضیات مشابه و با کمک گرفتن از روش اجزا محدود به بررسی تاثیرات ترک بر ارتعاشات لوله‌ها پرداختند [۳]. لی و همکاران [۴] به بررسی اثر ناپیوستگی (تکیه‌گاه، ترک، شیرآلات و ...) بر ارتعاشات لوله‌ها بر بستر پسترناک پرداختند. آنها از تبدیل لاپلاس به منظور حل معادلات بدست آمده بهره بردند. اسلامی و همکاران [۵] با استفاده از تئوری تیر اولبر برنولی به بررسی ارتعاشات لوله‌های ترک‌دار حاوی سیال در محیط‌های ویسکوالاستیک پرداختند، آنها ترک را به صورت همواره باز در نظر گرفته و آن را با فنر پیچشی با سختی معادل جایگزین نمودند. حسین‌زاده و فرشیدیان [۶] با استفاده از روش ماتریس انتقال و با بهره‌گیری از شکل مود اول سازه، روشی را جهت جستجوی ترک در لوله‌های تحت فشار ارائه نمودند. آنها ترک را به کمک فنر پیچشی مدلسازی نموده و اثرات ترک بر فرکانس‌های طبیعی و شکل موده‌های لوله را مورد بررسی قرار دادند.



رستاقی و نوری خاجوی طهرانی [۷] با استفاده از شبکه عصبی پرسپترون چند لایه^۱ به تعیین سائز و موقعیت نسبی ترک در لوله‌های حاوی سیال پرداختند. آن‌ها به این منظور از فرکانس‌های طبیعی ارتعاشات سیستم برای آموزش شبکه عصبی استفاده نمودند. طیبی و همکاران [۸] روشی بر اساس طبقه‌بندی و پیش‌بینی شبکه عصبی برای تشخیص موقعیت و راستای ترک در لوله‌ها ارائه نمودند. آن‌ها ابتدا از روش اجزا محدود برای مدلسازی انتشار موج و مدلسازی ترک در موقعیت و راستاهای مختلف استفاده نمودند و با استفاده از دو نوع موج تحریک هدایت شده طولی و پیچشی و اندازه‌گیری و تحلیل پژواک‌های بازتابیده با کمک تجزیه موجک گسسته سیگنال‌های خام به استخراج خواص ترک پرداختند. آن‌ها به این منظور، از روش الگوریتم کرم شب‌تاب و یک شبکه عصبی مصنوعی که موقعیت و راستای ترک را پیش‌بینی می‌کند، استفاده نمودند. جوادی و همکاران [۹] بر اساس فرض هندسی غیرخطی فون کارمن و تئوری پرتو اویلر-برنولی، معادلات دیفرانسیل جزئی هندسی غیرخطی ارتعاشات لوله انتقال سیال با یک ترک عرضی تنفسی، تحت تحریکات اولیه و ثانویه را بررسی نمودند. کسای و همکاران [۱۰] از تحلیل مودال و تحلیل اجزا محدود همراه با شبکه‌های عصبی مصنوعی برای تخمین عمق و محل یک ترک قوس دایره‌ای در لوله‌های حفاری سیستم‌های حفاری دوار استفاده نمودند. وو و همکاران [۱۱] با توجه به این نکته که جهت ترک بر موج اولتراسونیک منعکس شده از آن تأثیر می‌گذارد روشی را به منظور تخمین موقعیت و جهت ترک در لوله‌ها ارائه نمودند. آنها ابتدا همبستگی بین جهت ترک و انرژی منعکس شده اولتراسونیک را تحلیل نموده و سپس با توجه به تئوری و روش‌های تقریب تابع، یک مدل ریاضی از جهت ترک و انرژی بازتابی آن ارائه نمودند. سگویی و همکاران [۱۲] از شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی عمق ترک در ساختار خط لوله بر اساس تکنیک تحلیل مودال با استفاده از روش اجزا محدود استفاده نمودند. ایشان از بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای افزایش پارامترهای آموزشی شبکه‌های عصبی مصنوعی با به حداقل رساندن تفاوت بین خروجی‌های واقعی و مطلوب و سپس استفاده از این پارامترها برای تولید شبکه، استفاده نمودند.

در این پژوهش لوله‌های تحت فشار حاوی یک ترک به کمک تئوری اویلر برنولی مورد بررسی قرار خواهند گرفت. ترک عمود بر محور لوله بوده و به صورت باز در نظر گرفته شده و به کمک مدل فنر پیچشی مدلسازی خواهد شد. پژوهش مورد نظر شامل دو گام اساسی خواهد بود. در گام نخست و در حل مستقیم مسئله، فرکانس‌های ارتعاشات آزاد لوله مورد نظر به ازای مقادیر متفاوت عمق و مکان ترک محاسبه می‌گردد و تأثیر پارامترهای مختلف ترک بر ارتعاشات لوله مورد بررسی قرار می‌گیرد. در گام دوم و در حل معکوس، با استفاده از روش ابداع شده در گام نخست و به کمک الگوریتم بهینه‌سازی شاهین هریس^۵ روشی جهت تعیین مشخصات ترک (عمق و مکان ترک) به کمک فرکانس‌های ارتعاشات لوله ترک‌دار ارائه می‌گردد.

تئوری

پژوهش‌های انجام شده در زمینه سازه‌های ترک‌دار را می‌توان به دو دسته تقسیم‌بندی نمود: روش‌های مستقیم و معکوس. در روش‌های مستقیم، هدف یافتن چگونگی تأثیر پارامترهای ترک (ابعاد و محل) بر خصوصیات مودال سازه می‌باشد. در حالی که روش‌های معکوس به تعیین مشخصات ترک با استفاده از خواص مودال سازه می‌پردازند. در این پژوهش ابتدا مدل‌سازی لوله ترک‌دار انجام می‌شود. پس از آن با استفاده از روش مدلسازی ارائه شده، تشخیص ترک در لوله انجام خواهد شد. به منظور حل معادلات ارتعاشات خطی از روش المان کوادراتور دیفرانسیلی استفاده خواهد شد. برای صحت‌سنجی تحلیل‌های انجام شده، نتایج بدست آمده با نتایج ارائه شده در مقالات چاپ شده سایر محققین مقایسه می‌شود. سپس با تعریف یک مسئله

¹ Multilayer perceptron

² Finite Element Analysis

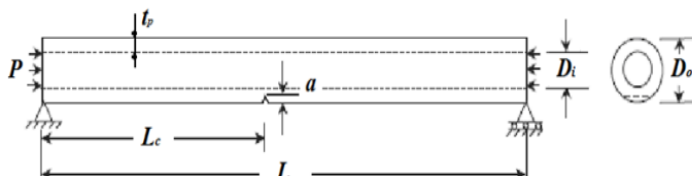
³ Artificial Neural Networks

⁴ Particle Swarm Optimization

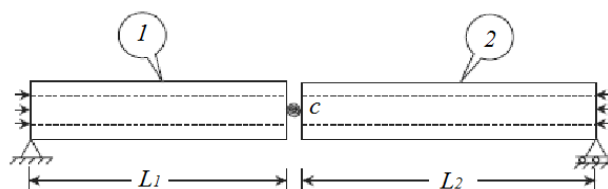
⁵ Harris Hawks Optimization



بهینه‌سازی جهت حداقل نمودن اختلاف پارامترهای مودال تجربی و عددی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی شاهین هریس، مشخصات ترک با استفاده از فرکانس‌های طبیعی ارتعاشات آن استخراج می‌گردد. به‌منظور مدل‌سازی ترک در یک لوله، لوله‌ای مشابه شکل (۱) در نظر گرفته می‌شود. مطابق شکل ترک عمود بر محور لوله بوده و در فاصله L_c از سمت چپ لوله قرار دارد و a عمق ترک می‌باشد. شکل (۲) شماتیک مدل فنر پیچشی لوله ترک‌دار را نمایش می‌دهد.



شکل ۱: لوله ترک‌دار



شکل ۲: شماتیک مدل لوله ترک‌دار

دیماروگوناس و پاپادوپولوس [۱۳] مدل فنر پیچشی بدون جرم تیر و شفت ترک خورده را پیشنهاد کردند و انعطاف پذیری اضافی ناشی از ترک را با استفاده از اصول مکانیک شکست بدست آوردند. در اینجا می‌توان سختی فنر چرخشی معادل را به صورت رابطه (۱) محاسبه نمود.

$$K_t = \frac{1}{c} \quad (1)$$

در جائیکه

$$c = \frac{2\pi(1-\nu^2)R_0^5}{EI^2} \int_{-b}^b \int_0^{a_x} (1-\bar{x}^2) \xi F^2\left(\frac{\xi}{h_x}\right) d\xi d\bar{x} \quad (2)$$

$F(\xi/h_x)$ نیز تابعی است که به صورت رابطه (۳) تعریف می‌گردد [۱۳]:

$$F(\xi/h_x) = \sqrt{\frac{2h_x}{\pi\xi} \tan\left(\frac{\pi\xi}{2h_x}\right)} \frac{0.923 + 0.199 \left(1 - \sin\left(\frac{\pi\xi}{2h_x}\right)\right)^4}{\cos\left(\frac{\pi\xi}{2h_x}\right)} \quad (3)$$

h_x در اینجا تابعی از هندسه المان در نظر گرفته شده در مرجع [۱۳] می‌باشد.

همان‌گونه که پیش از این ذکر گردید، ترک ایجاد شده در لوله موجب کاهش سختی آن در محل ترک می‌گردد و می‌توان به کمک مدل فنر چرخشی گسترده با سختی معادل، رفتار ترک را مدل نمود. لذا اجزا لوله در دو سوی ترک در مدل کوادراتور



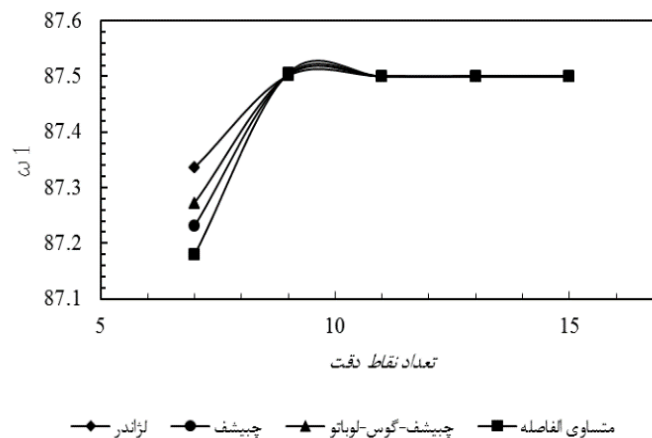
دیفرانسیلی توسط فنر چرخشی بدون جرم به هم متصل می‌شوند. شرایط سازگاری در محل ترک شامل ناپیوستگی دوران و پیوستگی جابجایی‌ها، ممان‌های خمشی و نیروهای برشی است. در ادامه معادلات حاکم به صورت رابطه (۴) ارائه گردیده است.

$$\frac{4y}{x^4} + \frac{PA_f L^2}{EI_p} \frac{2y}{x^2} - w^2 \frac{(r_p A_p + r_f A_f)}{EI_p} \frac{2y}{l^2} = 0 \quad (4)$$

در این رابطه w فرکانس طبیعی، L طول لوله، I_p ممان دوم سطح مقطع لوله، ρ_p دانسیته ماده لوله، ρ_f دانسیته سیال درون لوله، A_p و A_f به ترتیب سطح مقطع سیلندر سیال و لوله هستند.

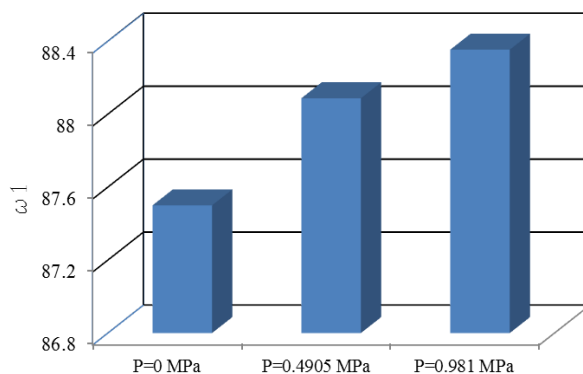
نتایج

در این بخش، ابتدا ضمن بررسی همگرایی نتایج، تاثیر نوع و تعداد نقاط دقت بر نتایج حاصل بررسی شده است. پس از آن به منظور بررسی صحت نتایج بدست آمده، نتایج حاصل با نتایج ارائه شده در سایر مراجع مقایسه شده است. در ادامه تاثیر پارامترهای ترک (عمق و محل ترک) بر فرکانس‌های طبیعی ارتعاشات لوله مورد بررسی قرار گرفته و در انتها به کمک روش‌های بهینه‌سازی، روشی جهت تعیین پارامترهای ترک به کمک فرکانس‌های طبیعی لوله ترک‌دار تحت فشار ارائه گردیده است. در این قسمت تاثیر نقاط دقت با فواصل مساوی، نقاط دقت با استفاده از چند جمله‌ای گوس-لوباتو-چبیشف، چبیشف و لژاندر بر فرکانس نخست ارتعاشات طبیعی لوله مورد بررسی قرار گرفته است. با بررسی نتایج ارائه شده در شکل (۳) مشاهده گردید که نقاط دقت لژاندر با ۱۱ نقطه دقت منجر به پاسخ‌هایی با دقت مطلوب می‌گردند. در محاسبه فرکانس‌های طبیعی لوله به دو المان در اطراف ترک، مطابق شکل (۲) تقسیم شده است. تعداد نقاط دقت ذکر شده در ادامه تعداد نقاط دقت مورد استفاده در هر المان می‌باشد. نتایج بدست آمده برای لوله آلومینیومی به طول $0.87 m$ ، قطر داخلی $0.02 m$ و قطر خارجی $0.033 m$ در شکل (۳) ارائه شده است. چگالی، ضریب پواسون و مدول الاستیسیته لوله مورد نظر به ترتیب برابر با $2645 kg/m^3$ ، 0.33 و $603478 GPa$ می‌باشد لوله پر از آب بوده که از دو طرف بر روی تکیه‌گاه مفصلی قرار گرفته است.



شکل ۳: تاثیر نقاط دقت مختلف بر فرکانس طبیعی اول لوله

در ادامه به منظور بررسی توانایی روش ارائه شده در استخراج فرکانس‌های طبیعی لوله تحت اثر فشار داخلی و سیال، فرکانس‌های طبیعی برای سه حالت مختلف که در مراجع مورد بررسی قرار گرفته است ارائه می‌گردد. ابتدا لوله پر از آب با فشار صفر و سپس لوله پر از آب با فشارهای $0.4905 MPa$ و $0.981 MPa$ بررسی می‌گردد. تاثیر فشار بر مقدار فرکانس اول لوله مورد نظر در شکل (۴) ارائه شده است. نقاط دقت مورد استفاده در اینجا نقاط دقت لژاندر می‌باشد.



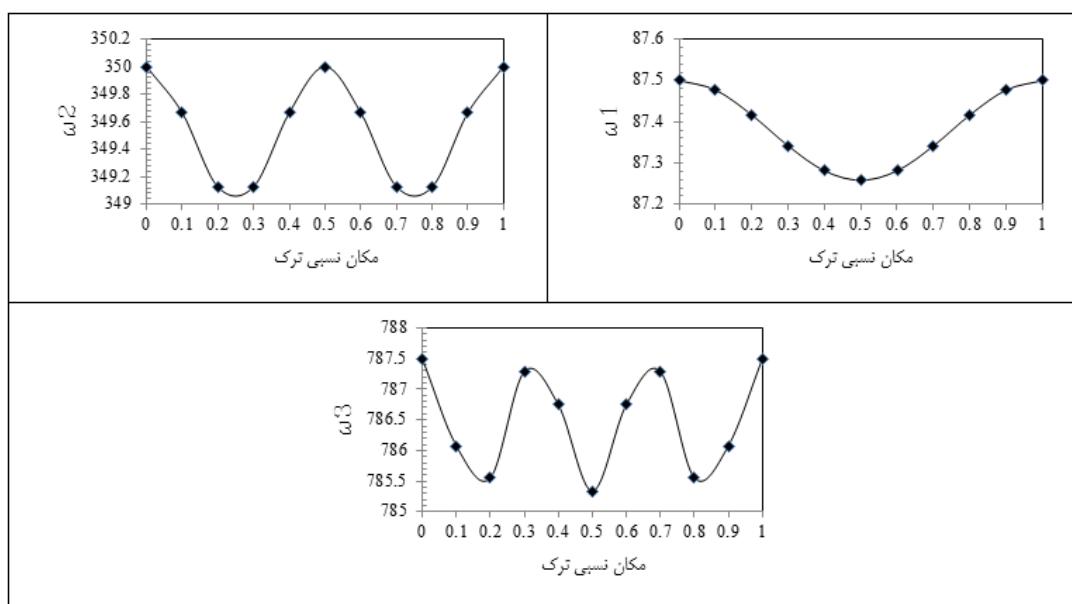
شکل ۴: تاثیر فشار بر فرکانس طبیعی اول لوله

در ادامه به منظور بررسی صحت روش مدلسازی مورد استفاده نتایج بدست آمده در مقایسه با نتایج ارائه شده در مرجع [۶] در جدول (۱) ارائه شده است.

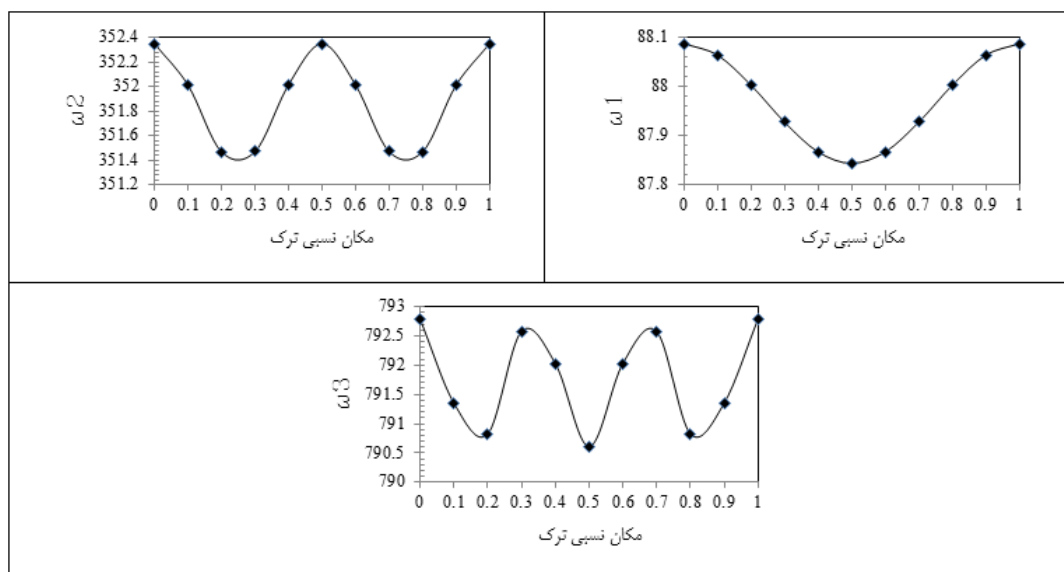
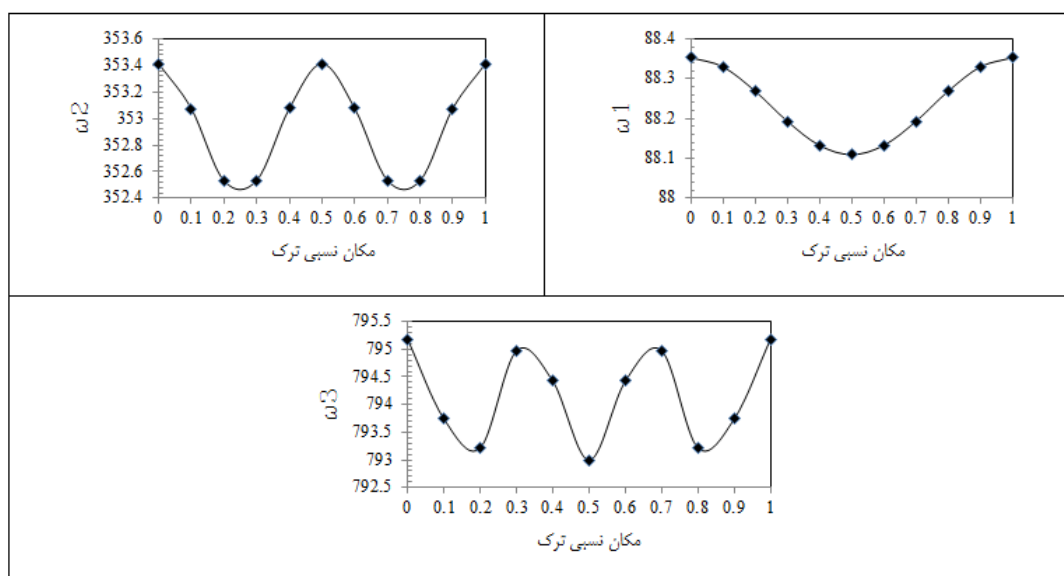
جدول ۱: مقایسه فرکانس‌های بدست آمده از روش کوادراتور دیفرانسیلی و سایر مراجع

فشار (مگاپاسکال)	فرکانس سوم	فرکانس دوم	فرکانس اول	مراجع
۰	۷۸۷/۵	۳۵۰	۸۸/۲	[۶] مرجع
۰/۴۹۰۵	۷۸۷/۵	۳۵۰	۸۷/۵	کوادراتور دیفرانسیلی
۰/۴۹۰۵	۷۹۲/۶۹	۳۵۲/۲۷	۸۸/۰۹	[۶] مرجع
۰/۴۹۰۵	۷۹۲/۷۹	۳۵۲/۳۵	۸۸/۰۹	کوادراتور دیفرانسیلی
۰/۹۸۱	۷۹۵/۰۷	۳۵۳/۲۹	۸۸/۰۹	[۶] مرجع
۰/۹۸۱	۷۹۵/۱۸	۳۵۳/۴۱	۸۸/۳۵	کوادراتور دیفرانسیلی

شکل‌های (۵) الی (۷) تغییرات سه فرکانس نخست لوله را به ازای مکان‌های متفاوت ترک نمایش می‌دهند. نتایج ارائه شده برای ترک‌های به عمق نسبی ۰/۳ می‌باشند.

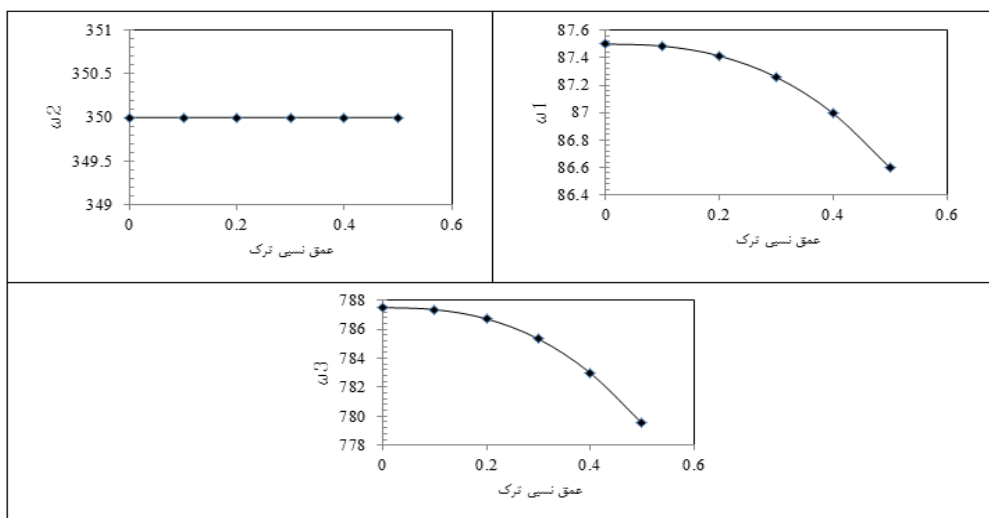


شکل ۵: تغییرات سه فرکانس نخست لوله بر حسب مکان نسبی ترک (فشار صفر)

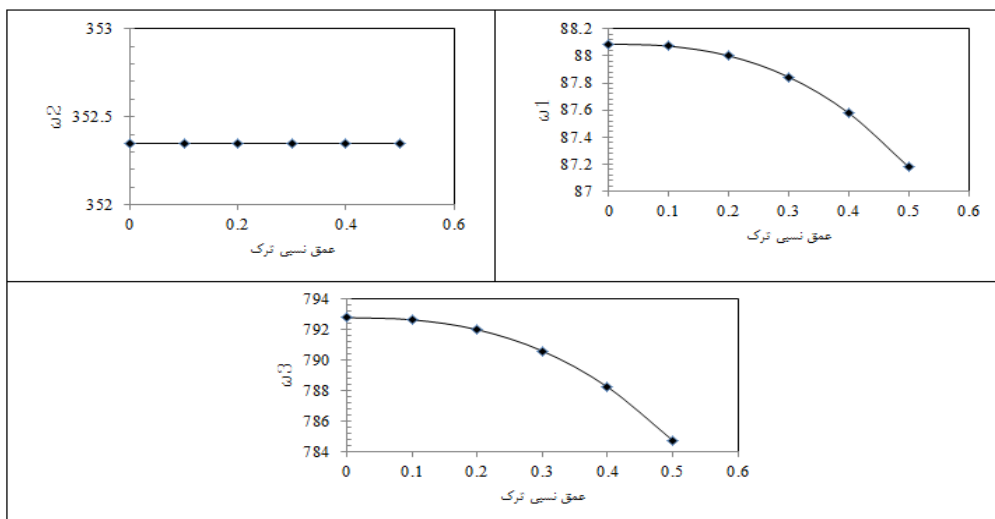
شکل ۶: تغییرات فرکانس‌های طبیعی در اثر تغییر مکان نسبی ترک (فشار 0.4905 MPa)شکل ۷: تغییرات فرکانس‌های طبیعی در اثر تغییر مکان نسبی ترک (فشار 0.981 MPa)

در شکل‌های (۵) الی (۷) با ثابت نگاه داشتن عمق نسبی ترک، اثر مکان نسبی ترک بر فرکانس‌های طبیعی اول تا سوم بررسی شده است، که مشاهده می‌گردد در صورتی که ترک بر روی خط گره یک مود خاص قرار داشته باشد فرکانس طبیعی مود مورد نظر تغییری نخواهد کرد. علت این مسئله صفر شدن گشتاور خمشی و به تبع آن صفر شدن ناپیوستگی شیب در دو سوی ترک می‌باشد که در نتیجه آن وجود ترک تاثیری بر فرکانس طبیعی نخواهد داشت. همچنین بیشترین تغییرات فرکانس طبیعی هر مود در نقطه‌ای از لوله است که انحنا مربوط به آن مود حداکثر است.

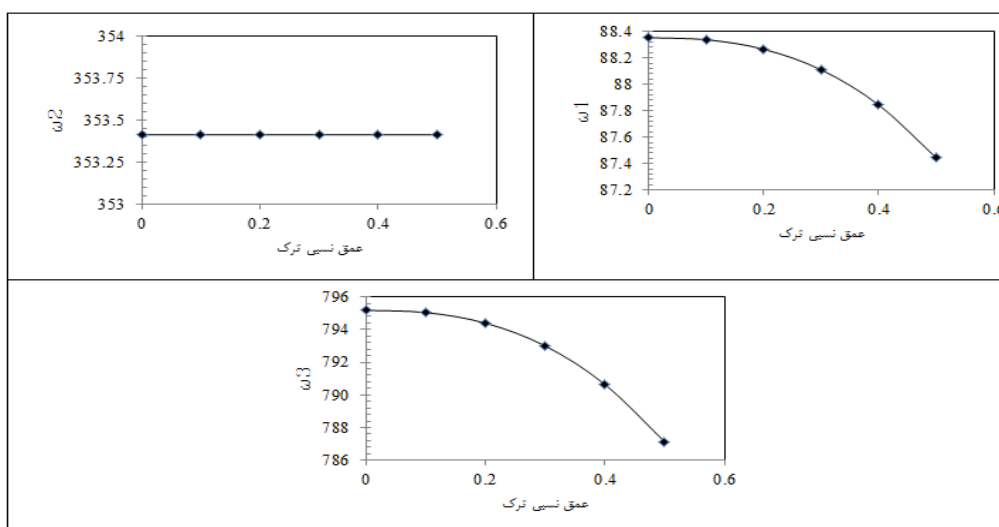
شکل‌های (۸) الی (۱۰) تغییرات سه فرکانس نخست ورق را به ازای مقادیر متفاوت عمق ترک نمایش می‌دهند. نتایج ارائه شده برای ترک‌های با مکان نسبی ۰/۵ می‌باشند. شکل (۸) مربوط به فشار صفر، شکل (۹) مربوط به فشار 0.4905 MPa و شکل (۱۰) مربوط به فشار 0.981 MPa می‌باشد.



شکل ۸: تغییرات سه فرکانس نخست لوله بر حسب عمق نسبی ترک (فشار صفر)



شکل ۹: تغییرات فرکانس‌های طبیعی در اثر تغییر عمق نسبی ترک (فشار ۰/۴۹۰۵ MPa)



شکل ۱۰: تغییرات فرکانس‌های طبیعی در اثر تغییر عمق نسبی ترک (فشار ۰/۹۸۱ MPa)



همانگونه که مشاهده می‌گردد با افزایش عمق ترک فرکانس‌های اول و سوم کاهش می‌یابند، چراکه با افزایش عمق ترک، سختی سازه کاهش یافته و لذا فرکانس‌های طبیعی کاهش می‌یابند. از سوی دیگر مشاهده می‌گردد که فرکانس دوم بدون تغییر مانده است. از آنجا که ترک بررسی شده در وسط ورق ($l_0/a=0.5$) و بر روی خط گره شکل مود دوم قرار گرفته است لذا اصولاً مود دوم از وجود ترک تاثیر نمی‌پذیرد.

تعیین محل و عمق ترک

در بخش‌های پیشین و در حل مستقیم مسئله، ارتعاشات لوله‌های ترک‌دار مورد بررسی قرار گرفت و تاثیر پارامترهای مختلف ترک بر فرکانس‌های طبیعی ارتعاشات لوله تحت فشار بررسی گردید. در ادامه و در حل معکوس، با کمک الگوریتم بهینه‌سازی شاهین هریس، محل و عمق ترک تخمین زده می‌شود. به این منظور تابع هزینه f ، به صورت رابطه ۵ تعریف می‌گردد که به کمک بهینه‌سازی این تابع هزینه با استفاده از الگوریتم شاهین هریس مقادیر پارامترهای ترک استخراج می‌گردد.

$$f(l_c/a, h_c/h, L_c/b) = \sum_{i=1}^5 w_i \left(\frac{\omega_i^p - \omega_i^e}{\omega_i^e} \right)^2 \quad (5)$$

در رابطه فوق ω_i^e فرکانس حل عددی نام ورق، ω_i^p فرکانس نام حاصل از حل تحلیلی (فرکانس پیش‌بینی شده) و w_i ضریب وزنی مربوط به هر فرکانس است. در این پژوهش به منظور استخراج خصوصیات ترک تنها از سه فرکانس طبیعی اول استفاده شده و همچنین ضریب وزنی به شکل 2^{1-i} به کار گرفته شده است. در اینجا i معرف شماره مود مورد نظر است.

جدول ۲: سه فرکانس طبیعی نخست ورق‌های ترک‌دار به ازای مقادیر متفاوت پارامترهای ترک.

شماره	خصوصیات ترک		فرکانس‌های طبیعی (Hz)		
	h_c/D_0	L_c/L	فرکانس اول	فرکانس دوم	فرکانس سوم
۱	۰/۱	۰/۱	۸۸/۳۵۲۰	۳۵۳/۳۹۲۳	۷۹۵/۰۹۲۲
۲	۰/۱	۰/۲	۸۸/۳۴۸۱	۳۵۳/۳۵۷۸	۷۹۵/۰۶۲۰
۳	۰/۱	۰/۳	۸۸/۳۴۳۳	۳۵۳/۳۵۷۹	۷۹۵/۱۶۸۴
۴	۰/۱	۰/۴	۸۸/۳۳۹۵	۳۵۳/۳۹۲۵	۷۹۵/۱۳۲۸
۵	۰/۱	۰/۵	۸۸/۳۳۸۰	۳۵۳/۴۱۳۹	۷۹۵/۰۴۱۸
۶	۰/۳۰	۰/۱۰	۸۸/۳۳۰۱	۳۵۳/۰۷۵۴	۷۹۳/۷۴۳۷
۷	۰/۳۰	۰/۲۰	۸۸/۲۶۸۹	۳۵۲/۵۳۱۵	۷۹۳/۱۶۲۹
۸	۰/۳۰	۰/۳۰	۸۸/۱۹۳۵	۳۵۲/۵۳۴۰	۷۹۴/۹۷۳۰
۹	۰/۳۰	۰/۴۰	۸۸/۱۳۲۷	۳۵۳/۰۷۷۴	۷۹۴/۴۲۳۹
۱۰	۰/۳۰	۰/۵۰	۸۸/۱۰۹۵	۳۵۳/۴۱۳۹	۷۹۲/۹۹۵۶
۱۱	۰/۵۰	۰/۱۰	۸۸/۲۶۵۴	۳۵۲/۱۴۰۴	۷۸۹/۷۸۷۰
۱۲	۰/۵۰	۰/۲۰	۸۸/۰۳۵۷	۳۵۰/۱۲۷۹	۷۸۷/۹۶۲۰
۱۳	۰/۵۰	۰/۳۰	۸۷/۷۵۴۶	۳۵۰/۱۶۱۶	۷۹۴/۴۱۲۳
۱۴	۰/۵۰	۰/۴۰	۸۷/۵۲۹۶	۳۵۲/۱۶۵۸	۷۹۲/۳۷۴۲
۱۵	۰/۵۰	۰/۵۰	۸۷/۴۴۴۲	۳۵۳/۴۱۳۹	۷۸۷/۱۳۴۳

جدول (۳) نتایج حاصل از پیش‌بینی خصوصیات ترک به کمک روش بهینه‌سازی برنامه‌نویسی شاهین هریس را به ازای فرکانس‌های ارائه شده در جدول (۲) نمایش می‌دهد. صحت و دقت نتایج بدست آمده از طریق مقایسه آن‌ها با مقادیر واقعی



تخمین زده شده و به کمک محاسبه مقادیر خطای تعریف شده در روابط (۶) و (۷) محاسبه شده است. E_L و E_h به ترتیب خطاهای نسبی عمق نسبی و مکان نسبی ترک می‌باشند.

جدول ۳: نتایج پیش‌بینی خصوصیات ترک به کمک روش معرفی شده

شماره	خصوصیات ترک		درصد خطای نسبی	
	h/D_o	L_o/L	E_L	E_h
۱	۰/۱۰۰	۰/۱۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۲	۰/۲۰۰	۰/۱۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۳	۰/۳۰۰	۰/۱۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۴	۰/۴۰۰	۰/۱۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۵	۰/۵۰۰	۰/۱۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۶	۰/۱۰۰	۰/۳۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۷	۰/۱۹۹	۰/۳۰۰	۰/۵۰	۰/۰۰
۸	۰/۳۰۱	۰/۳۰۰	۰/۳۳	۰/۰۰
۹	۰/۴۰۰	۰/۳۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۱۰	۰/۴۹۳	۰/۳۰۰	۱/۰۴	۰/۰۰
۱۱	۰/۱۰۰	۰/۵۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۱۲	۰/۲۰۰	۰/۵۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۱۳	۰/۳۰۰	۰/۵۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۱۴	۰/۴۰۰	۰/۵۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰
۱۵	۰/۵۰۰	۰/۵۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰

$$E_L = \left| \frac{l_c^e - l_c^p}{a} \right| \times 100 \quad (۶)$$

$$E_h = \left| \frac{h_c^e - h_c^p}{h} \right| \times 100 \quad (۷)$$

نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک روش غیرمخرب برای تشخیص ترک در لوله‌های ترک‌دار حاوی سیال تحت فشار ارائه شده است. در این روش، ترک به کمک فتر چرخشی بدون جرم مدلسازی گردیده است. معادلات حاکم بر مسئله ارتعاشات لوله به کمک تئوری اویلر برنولی استخراج گردید. برای حل دستگاه معادلات دیفرانسیل ارتعاشی، معادلات با روش کوادراتور دیفرانسیلی گسسته شده و دستگاه معادلات دیفرانسیلی مورد نظر به یک دستگاه مقادیر ویژه تبدیل شده است. با حل آن، فرکانس‌های طبیعی ارتعاشات لوله ترک‌دار بدست آمده‌اند. به منظور بررسی صحت نتایج حاصل، از نتایج سایر مراجع استفاده شد. برای تشخیص ترک از کمینه نمودن مجموع وزنی مجذورات اختلاف فرکانس‌های طبیعی تجربی و عددی توسط الگوریتم بهینه‌سازی شاهین هریس استفاده شده است. بررسی‌های انجام شده نشان داد که استفاده از نقاط دقت لژاندر دارای دقت و همگرایی بهتری نسبت به استفاده از نقاط دقت چبیشف، گوس-لوباتو-چبیشف و متساوی الفاصله است. همچنین مشاهده گردید که الگوریتم بهینه‌سازی شاهین هریس با دقت قابل قبولی محل و عمق نسبی ترک را با استفاده از فرکانس‌های لوله ترک‌دار پیش‌بینی نمود.



مراجع

- [1] Lee, D. M., Choi, M.J., and Oh, T. Y., (1996), Transfer matrix modelling for the 3-dimensional vibration analysis of piping system containing fluid flow, *KSME Journal*, 10, pp 180-189.
- [2] Yu, Z., Zhang, L., and Hu, J., (2017), Cracked modeling and vibration analysis of pipe with a part-through crack, *Journal of Vibroengineering*, 19(2), pp 930-942.
- [3] Yu, Z., Zhang, L., and Hu, J., (2016), Damage modeling and simulation of vibrating pipe with part-through circumferential crack, *Journal of Vibroengineering*, 18(4), pp 2176-2185.
- [4] Li, M., Chen, X., Chang, X., Qin, Y., and Li, Y., (2022), General analytical solution for vibrations of pipes with arbitrary discontinuities and generalized boundary condition on Pasternak foundation, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 162, pp 107910.
- [5] Eslami, G., Maleki, V. A., and Rezaee, M., (2016), Effect of open crack on vibration behavior of a fluid-conveying pipe embedded in a visco-elastic medium, *Latin American Journal of Solids and Structures*, 13, pp 136-154.
- [۶] حسین زاده، م.، فرشیدیان فر، ا.، (۱۳۹۱)، ردیابی ترک عرضی در لوله های حاوی سیال تحت فشار داخلی، نشریه پژوهشی مهندسی مکانیک ایران، ۱۱۴(۱)، ص ۲۰ - ۳۹.
- [۷] رستاقی، م.، نوری خاجوی طهرانی، م.، (۱۳۹۳)، تشخیص سایز و موقعیت نسبی ترک در لوله های حاوی سیال با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، مجله مهندسی مکانیک مدرس، ۱۴(۷)، ص ۳۵-۴۷.
- [۸] طیبی، س.، یاقوتیان، ا.، فتاحی، ل.، (۱۴۰۰)، به کارگیری شبکه عصبی برای پیش بینی موقعیت و راستای عیوب لوله در آزمون فراصوتی با امواج هدایت شده، نشریه فناوری آزمون های غیرمخرب، ۲(۸)، ص ۸-۱۷.
- [9] Javadi, M., M. Noorian, and Irani, S., (2021), Nonlinear vibration analysis of cracked pipe conveying fluid under primary and superharmonic resonances, *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 191, pp 104326.
- [10] Kessai, I., Benammar, S., Doghmane, M. Z., and Tee, K. F., (2022), Estimation of circular arc crack depths and locations in rotary drilling pipes subjected to free vibrations, *Vibration*, 5(1), pp 165-182.
- [11] Wu, H., Lv, Y., and Chen, Y., (2022), A method of estimation for the area and direction of pipe crack, in *Journal of Physics: Conference Series*, 2264(1), pp 012019.
- [12] Seguini, M., Khatir, S., Boutchicha, D., Nedjar, D., and Abdel Wahab, M., (2021), Crack prediction in pipeline using ANN-PSO based on numerical and experimental modal analysis, *Smart Structures and Systems*, 27(3), pp 507-523.
- [13] Dimarogonas, A. and Papadopoulos, C., (1983), Vibration of cracked shafts in bending, *Journal of sound and vibration*, 91(4), pp. 583-593.