



پیش‌بینی خرابی خطوط لوله آسیب‌دیده با کمک شبیه‌سازی اجزاء محدود برهمکنش سیال-سازه

و شبکه عصبی

مصطفی شیرافکن^۱، حامد افراسیاب^{۲*}، علی دیوسالار^۳، علی محمد باغستانی^۴، معین رحمتی^۵^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل^۲ استادیار، دانشکده مهندسی مواد و صنایع، دانشگاه صنعتی بابل^۳ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی بابل^۴ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل^۵ مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۷/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۱۴

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۴/۲۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۷/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۱۴

چکیده

بروز شکست در خطوط لوله سبب خسارات زیادی از جمله آسیب به محیط زیست و منابع طبیعی و تحمیل هزینه‌های بالای تعمیرات می‌گردد؛ لذا در این پژوهش با بهره‌گیری از شبیه‌سازی اجزاء محدود پدیده برهمکنش سیال-جامد بین سیال عبوری و لوله آسیب دیده، توزیع تنش و خرابی در لوله آسیب‌دیده مورد بررسی شده است. با توجه به زمانبر بودن شبیه‌سازی برهمکنش سازه-سیال با روش اجزاء محدود، از یک شبکه عصبی مصنوعی نیز به منظور پیش‌بینی رفتار خطوط لوله آسیب دیده استفاده شده تا بتواند با تغییر شرایط کاری یا آسیب لوله رفتار آن را پیش‌بینی نماید. جهت آموزش این شبکه عصبی مصنوعی از الگوریتم انتشار بازگشتی بهره گرفته شده است. به این منظور، ابتدا بیشینه تنش‌ها در لوله معیوب برای مقادیر مختلف سرعت سیال، اندازه، فاصله و عمق آسیب با روش اجزاء محدود محاسبه و به عنوان تابع هدف در نظر گرفته شده است. سپس از مقادیر به دست آمده برای آموزش شبکه عصبی استفاده گردیده است. برای بدست آوردن ساختار بهینه شبکه عصبی و افزایش دقت آن، مقادیر پارامترهای طراحی با روش تاگوچی تعیین شده است. نتایج به دست آمده نشان دادند که ترکیب روش اجزاء محدود برای تحلیل برهمکنش سازه-سیال و روش شبکه عصبی مصنوعی، ابزار مناسبی برای بررسی و پیش‌بینی شکست در لوله‌های معیوب است.

کلمات کلیدی: عیوب لوله‌های انتقال سیال؛ برهمکنش سازه-سیال؛ شبکه عصبی مصنوعی؛ تحلیل شکست.

Failure prediction in defective pipelines using finite element simulation of fluid-structure interaction and neural network method

Mostafa Shirafkan¹, H. Afrasiab^{2,*}, A. Divsalar³, A.M. Baghestani⁴, M. Rahmati⁵

¹ MSc. Student, Mech. Eng., Babol Noshirvani University of Technology, Mazandaran, Iran

² Assoc. Prof., Mech. Eng., Babol Noshirvani University of Technology, Mazandaran, Iran

³ Assist. Prof., Mat. Ind. Eng., Babol Noshirvani University of Technology, Mazandaran, Iran

⁴ Assist. Prof., Mech. Eng., Babol Noshirvani University of Technology, Mazandaran, Iran

⁵ Ph.D. Student, Mech. Eng., Babol Noshirvani University of Technology, Mazandaran, Iran

Abstract

The occurrence of pipeline failures can lead to significant damage to the environment and natural resources, as well as high repair costs. In this study, the finite element simulation is employed to model the fluid-structure interaction between the fluid flow and the damaged pipe wall to investigate stress distribution and failure in damaged pipes. Given the time-consuming nature of this simulation, an artificial neural network is also used to predict the behavior of the damaged pipe. This neural network is trained using a recurrent backpropagation algorithm. To this end, the maximum stress in the damaged pipe is considered as the objective function and is calculated by the finite element method for different values of the flow velocity, size, distance, and depth of the defects. The design parameters are selected by Taguchi method to optimize the neural network structure and increase its accuracy. The results have suggested that combining the finite element and artificial neural network methods is an effective approach for failure prediction in defective pipelines.

Keywords: Defects of fluid transmission pipes; Fluid-structure interaction; Artificial neural network; Failure prediction.

۱- مقدمه

خطوط لوله از متداول‌ترین روش‌های انتقال سیالات در سراسر جهان هستند. این لوله‌ها نفت و گاز را به واحد بهره‌برداری، تقطیر، پالایشگاه و یا پایانه جهت صدور منتقل می‌کنند. بروز شکست در این خطوط خسارات جانی و مالی زیادی را به همراه دارد که از این میان می‌توان به آسیب‌های وارده به محیط‌زیست و منابع طبیعی و همچنین هزینه‌های بالای تعمیرات اشاره نمود [۱-۳]. از این رو، بررسی رفتار عیوب موجود در خط لوله از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

حمل و نقل نفت و گاز و فرآورده‌های آن‌ها از طریق خطوط لوله، در مقایسه با سایر روش‌های حمل و نقل مانند تانکرها، راه‌آهن، کامیون‌ها و غیره، ایمن و از نظر اقتصادی کارآمدتر است [۴-۶]. با این حال، خطوط لوله نیز در معرض خطرات مختلفی قرار دارند. از این رو در مطالعات بسیاری به بررسی رفتار خرابی خطوط لوله آسیب‌دیده پرداخته شده است. به عنوان نمونه، نتو و همکارانش در سال ۲۰۰۵ برای پیش‌بینی فشار شکست در لوله‌های دارای آسیب خارجی واحد از آزمون‌های تجربی به همراه شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود با نرم‌افزار آباکوس بهره گرفتند [۷]. با کمک نتایج حاصل، آن‌ها روابطی برای پیش‌بینی فشار شکست لوله بصورت تابعی از عمق خوردگی، طول و قطر لوله ارائه نمودند. فکه و وارگا در سال ۲۰۱۱ به بررسی فشار شکست لوله‌های انتقال نفت خام و گاز طبیعی با آسیب خارجی پرداختند [۸]. شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود و با کمک نرم‌افزار انسیس انجام شده و تاثیر نسبت عرض به طول آسیب بر فشار شکست بررسی گردید. نتایج بدست آمده برای لوله‌هایی با دو قطر و جنس مختلف لوله نشان داد که تاثیر عمق آسیب به مراتب مهم‌تر از تاثیر طول و عرض آن است. ژو و چنگ در سال ۲۰۱۲ تغییرات فشار شکست را برای انواع مختلف فولاد مورد استفاده در خطوط لوله که دارای نقص خوردگی بودند بررسی کردند [۹]. آن‌ها بر روی جنس لوله متمرکز شدند و مشاهده کردند که با افزایش عمق خوردگی و کاهش درجه فولاد، فشار شکست لوله کاهش می‌یابد. چوی و همکارانش در سال ۲۰۱۵ استحکام یک لوله آسیب‌دیده که همزمان تحت فشار داخلی و خارجی قرار داشت را مورد مطالعه دادند [۱۰]. آن‌ها میزان آسیب وارد بر لوله را با توجه طول، عرض و عمق آسیب درجه‌بندی کرده و لوله‌های دارای درجات مختلف آسیب را در نرم‌افزار آباکوس

شبیه‌سازی کردند. در نهایت آن‌ها به این نتیجه رسیدند که رفتار خط لوله در مواجهه با آسیب داخلی و خارجی یکسان است. ضمن اینکه عمق آسیب به عنوان مهم‌ترین عامل ایمنی شناسایی شده و مشاهده گردید با افزایش عمق آسیب، تنش فون میزز به شدت افزایش یافته و فشار شکست به سرعت کاهش می‌یابد. ژو و همکارانش در سال ۲۰۱۷ رفتار خرابی خطوط لوله دارای خوردگی‌های در تعامل با هم را با استفاده از روش اجزاء محدود بررسی کردند [۱۱]. آن‌ها سپس راه‌حلی برای پیش‌بینی فشار انفجار با استفاده از یک شبکه عصبی مصنوعی پیشنهاد کردند. برای در نظر گرفتن اثر سیال، فشار ثابتی به داخل لوله اعمال کرده و جهت صحت‌سنجی از نتایج آزمایشگاهی موجود در مطالعات قبلی استفاده نمودند. بروئر و همکارانش در سال ۲۰۱۹ با کمک روش اجزاء محدود خرابی خطوط لوله دارای خوردگی را تحت ترکیب فشار داخلی و نیروی محوری فشاری مطالعه نمودند [۱۲]. دو هندسه ایده‌آل برای آسیب که شامل دو و سه شکل مستطیلی می‌شد بررسی گردید. نتایج نشان داد با افزایش نیروی محوری فشاری مقدار فشار خرابی کاهش می‌یابد. کانگ و همکارانش در سال ۲۰۲۰ از روش‌های تجربی و اجزاء محدود برای بررسی عملکرد لوله‌های آسیب‌دیده و بتونه‌شده بهره گرفتند [۱۳]. آن‌ها تاثیر ابعاد آسیب و خواص مکانیکی بتونه را بر فشار خرابی لوله مطالعه کردند. غلامی و همکارانش در سال ۲۰۲۱ مدل الاستیک-پلاستیک سخت‌شونده همسانگرد را برای مدلسازی اجزاء محدود لوله‌های فولادی معیوب پیاده‌سازی کردند [۱۴]. با کمک این مدل آن‌ها اثر پارمترهایی مانند ضریب کرنش‌سختی، هندسه لوله و هندسه خرابی را بر استحکام باقیمانده لوله آسیب‌دیده بررسی نمودند. ساکوندرو و پاردرس در سال ۲۰۲۳ از یک معیار خرابی وابسته به دما برای مطالعه پاسخ مکانیکی یک لوله فولادی آسیب‌دیده در دماهای مختلف بهره گرفتند [۱۵]. آن‌ها معیار خرابی را در روش اجزاء محدود پیاده کرده و برای اعتبارسنجی از نتایج آزمایشگاهی موجود استفاده نمودند.

شرایط هر لوله می‌تواند با بازرسی مستقیم و با استفاده از روش‌هایی مانند تشدید الکترومغناطیسی، بایش صوتی یا رادار برآورد گردد؛ اما به دلیل این‌که هزینه‌های مربوط به بازرسی مستقیم بسیار بالا است و در هر شرایطی نیز قابل اجرا نیست پیش‌بینی شکست با کمک روش‌های تحلیلی و مدلسازی از

سیال قرار دارد. قطر و ضخامت لوله مطابق با مرجع [۱۶] انتخاب شده و انحنای زانویی لوله ۱/۵ برابر قطر لوله، طول ورودی لوله ۲۰ برابر قطر لوله و طول خروجی لوله ۱۰ برابر قطر لوله فرض شده است [۱۷]. انتخاب طول بلند برای ورودی لوله، به منظور رسیدن به جریان کاملاً توسعه یافته و مواجه نشدن با فشار منفی در انتهای خروجی لوله بوده است [۱۸-۱۹]. جدول (۱) خصوصیات و جنس خطوط لوله شبیه‌سازی شده را نشان می‌دهد.

جدول ۱- جنس و خصوصیات خطوط لوله	
ماده	پلی‌اتیلن
اندازه‌های هندسی	قطر لوله: ۴۵۸/۸ میلی‌متر
	ضخامت: ۸/۱ میلی‌متر
	مقدار انحنای زانویی: ۱/۵ برابر قطر لوله
خصوصیات مکانیکی	چگالی: 950 kg/m^3
	مدول یانگ: ۱۱۰۰ MPa
	نسبت پواسون: ۰/۴۲
	تنش تسلیم: ۲۵ MPa استحکام نهایی: ۳۳ MPa

جریان عبوری از لوله پایا، تراکم ناپذیر^۳ و کاملاً توسعه‌یافته^۳ فرض شده است. منظور از آسیب وارد بر لوله‌ها فرورفتگی‌هایی است که در اثر برخورد جسم خارجی در محیط خارجی لوله ایجاد شده است. آسیب‌ها دارای شکل مربعی بوده و فرض شده چند آسیب در کنار هم روی لوله وجود دارد. هندسه کلی و فواصل اولیه بین آسیب‌ها که در شکل (۱) نمایش داده شده از مرجع [۱۶] اقتباس گردیده است. مقادیر طول، عرض و عمق آسیب‌ها به صورت نسبت‌هایی از قطر داخلی لوله انتخاب شده و با تغییر آن‌ها رفتار لوله مطالعه گردیده است.

به منظور تعیین مکان قرارگیری آسیب روی لوله‌ها، ابتدا بحرانی‌ترین منطقه زانویی شناسایی گردید. به این منظور، جریان سیال در لوله بدون آسیب شبیه‌سازی شده و مشاهده گردید در حالت‌های مختلف، بیشینه تنش زانویی لوله بدون آسیب، در زاویه بین ۲۷/۵ تا ۳۱/۴ درجه از ابتدای خروجی زانویی لوله‌ها رخ می‌دهد. با توجه به این یافته و به منظور بررسی بحرانی‌ترین شرایط، مکان مرکز آسیب‌ها در ناحیه

اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. افزون بر این، مرور مطالعات پیشین نشان می‌دهد، جای پژوهش‌های سیستماتیک و جامع که در آن‌ها لوله دارای چند آسیب موضعی مجاور هم بوده و تأثیر این آسیب‌ها در کنار هم بر استحکام لوله بررسی شده باشد خالی است. ضمن اینکه در بیشتر مطالعات، فشار وارد از سیال بر دیواره لوله به صورت یک فشار داخلی ثابت در نظر گرفته شده است. در حالیکه در مناطقی از خطوط لوله مانند زانویی‌ها و یا نقاطی که قطر لوله تغییر می‌کند، تغییرات فشار وجود دارد که این امر تحلیل جریان سیال و اعمال فشار دقیق سیال به دیواره لوله از طریق تحلیل برهمکنش سیال-جامد را ضروری می‌نماید.

با توجه به موارد فوق‌الذکر در پژوهش حاضر، از شبیه‌سازی برهمکنش سیال-جامد در چارچوب روش اجزاء محدود برای تعیین دقیق فشار وارد بر نقاط بحرانی لوله استفاده شده است. ضمناً، به جای فرض یک آسیب منفرد روی لوله، هندسه آسیب به صورت چهار مربع در کنار هم فرض شده تا بتوان رفتار لوله را برای حالت‌های مختلفی که آسیب‌های مجاور هم روی لوله ایجاد شده‌اند مطالعه نمود. با توجه به زمانبر بودن مدلسازی اجزاء محدود، از یک مدل شبکه عصبی مصنوعی برای پیش‌بینی فشار شکست کمک گرفته شده است. برای آموزش شبکه عصبی مذکور از نتایج شبیه‌سازی اجزاء محدود استفاده گردیده است. جهت بدست آوردن ساختار بهینه شبکه عصبی و افزایش دقت آن، مقادیر پارامترهای طراحی با روش تاگوچی تعیین شده است. نتایج بدست آمده نشان داده‌اند ترکیب شبیه‌سازی اجزاء محدود برهمکنش سیال-جامد و شبکه عصبی مصنوعی که در این مقاله برای اولین بار پیشنهاد شده ابزاری قدرتمند برای پیش‌بینی شکست در لوله‌های آسیب‌دیده است. جزئیات روش‌های مورد استفاده در بخش‌های بعدی تشریح شده است.

۲- روش تحقیق و معادلات حاکم

در این تحقیق، به منظور بررسی تأثیر متغیرهای مختلف بر روی بیشینه تنش وارد بر لوله‌های آسیب‌دیده، سیال عبوری از لوله‌هایی بررسی شده‌اند که دارای آسیب در زانویی هستند. انتخاب زانویی به این سبب بوده که در معرض بیشترین فشار

³ fully developed

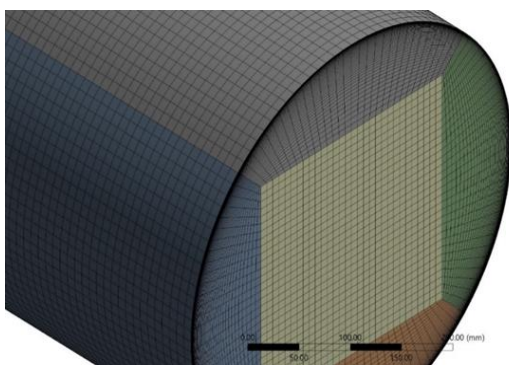
¹ steady state

² incompressible

جدول ۲- شرایط مرزی مسئله

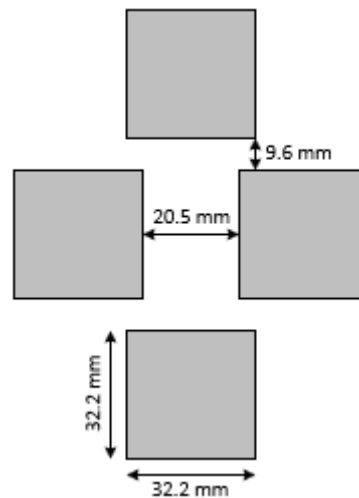
عنوان مرز	ناحیه مرز	شرط مرزی
ورودی جریان آب	سیال	سرعت ورودی
خروجی جریان آب	سیال	فشار صفر
ابتدای لوله	جامد	جابجایی صفر
انتهای لوله	جامد	جابجایی صفر

مدلسازی مسأله توسط نرم‌افزارهای انسیس^۱ و فلوئنت^۲ انجام گرفته است. برای شبکه‌بندی مسئله، از شبکه ساختار یافته استفاده شده و در نقاط حساس مانند اطراف آسیب و مناطق گلویی، از المان‌های ریزتر و با تراکم بیشتر استفاده شده است. در شبکه‌بندی هندسه مسئله به‌منظور استفاده از مدل سیالاتی $K - \omega$ ، سعی شده تا فاکتورهای شبکه‌بندی نظیر کیفیت نسبت منطری^۳ و کیفیت خوابیدگی^۴ در بهینه‌ترین حالت ممکن قرار گیرند. به‌منظور دستیابی به مقادیر γ^+ نزدیک به عدد یک، شبکه‌بندی در نزدیکی دیواره لوله به شدت ریز در نظر گرفته شده است؛ همچنین در شبکه‌بندی بخش مربوط به جامد، به‌منظور داشتن دقت بیشتر، در قسمت آسیب‌دیده لوله از شبکه‌بندی‌های به مراتب ریزتری استفاده شده است. در شکل‌های (۳) و (۴) به ترتیب شبکه‌بندی ساختار یافته سیال و یک نمونه از شبکه‌بندی آسیب روی زانویی لوله نشان داده شده است. از آنجا که مدل سیالاتی $SST K - \omega$ بهترین نتایج را در بخش صحت‌سنجی ارائه داده در تمام تحلیل‌ها از این مدل استفاده گردیده است.

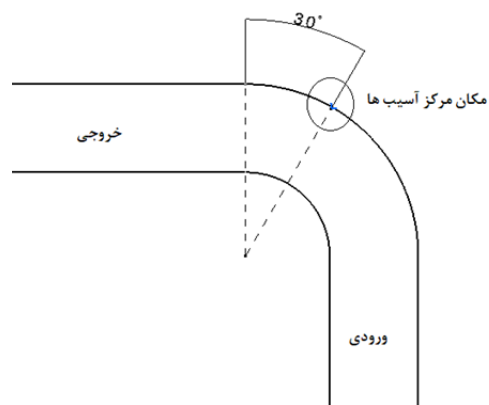


شکل ۳- شبکه‌بندی بخش مربوط به سیال

دارای بیشترین تنش و در زاویه ۳۰ درجه نسبت به ابتدای خروجی زانویی لوله‌ها انتخاب‌گردیدند. شکل (۲) زاویه مورد نظر را نشان می‌دهد. مکان آسیب‌ها در این شکل با دایره نشان داده شده است.



شکل ۱- هندسه کلی آسیب



شکل ۲- مکان مرکز آسیب‌ها

جدول (۲) شرایط مرزی مورد استفاده در این تحقیق را نشان می‌دهد. از آنجا که سرعت سیال عنوان یکی از پارامترهای مورد بررسی در این تحقیق است، مقادیر متفاوتی از آن در شبیه‌سازی‌های مختلف استفاده شده است.

³ Aspect Ratio

⁴ Skewness

¹ Ansys

² Fluent

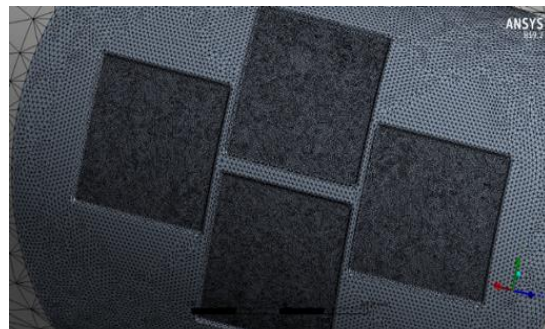
۳- مدل سازی شبکه عصبی مصنوعی

در مسائل شبیه سازی برهمکنش سیال-جامد نیاز است، دو محیط سیال و جامد بصورت جداگانه حل شده و بعد از تبادل اطلاعاتی مانند نیروی سیال و جابجایی جامد بین دو محیط، مسأله کوپل سیال- جامد نیز حل شود؛ لذا انجام این شبیه سازی فرایندی زمانبر است. بطوریکه در پژوهش حاضر انجام هر یک از شبیه سازی های اجزاء محدود بر روی یک رایانه با پردازنده اینتل هفت-هسته ای با ۳۲ گیگابایت رام بطور متوسط چهار ساعت طول می کشید؛ اما در صورت آموزش و بهره گیری از شبکه عصبی این زمان را می توان به چند دقیقه کاهش داد؛ لذا برای کاهش هزینه و زمان محاسباتی در این مقاله از روش شبکه عصبی استفاده گردیده است.

به منظور تشکیل شبکه عصبی مصنوعی، چهار عامل تأثیرگذار، شامل سرعت سیال، اندازه آسیب، عمق آسیب و فاصله بین آسیب ها به عنوان ورودی شبکه و بیشینه تنش وارد بر لوله به عنوان خروجی شبکه انتخاب شده اند.

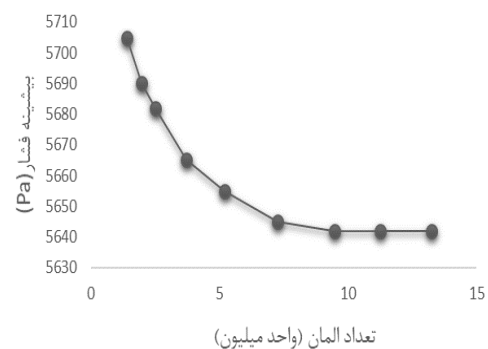
به کارگیری شبکه عصبی مصنوعی به علت دارا بودن پارامترهای مختلف، نیاز به تجربه و مهارت زیادی دارد. در این مطالعه، با به کارگیری روش طراحی آزمایش های تاگوچی، تلاش می شود تا سطوح بهینه پارامترهای مورد نیاز، تعیین شود. به کارگیری این الگو علاوه بر کاهش زمان و هزینه های پیش بینی، امکان دستیابی به دقت بیشتر نسبت به روش سعی و خطا را مهیا می کند.

روش تاگوچی دارای هفت مرحله است: شناسایی شاخص های بهره وری به عنوان متغیرهای ورودی، تعیین عوامل قابل کنترل و سطوح آن ها، انتخاب آرایه متعامد مناسب به منظور طراحی آزمایش ها، انتخاب معیار مناسب به منظور سنجش کارایی شبکه عصبی، اجرای آزمایش و محاسبه نسبت سیگنال به نویز، تعیین سطوح بهینه هر یک از پارامترهای کنترل و آخرین مرحله انجام آزمایش تأییدی. شاخص های بهره وری همان پارامترهای موثر بر مقدار خروجی مساله است. در این مطالعه این پارامترها عبارتند از: سرعت سیال، اندازه آسیب، عمق آسیب و فاصله آسیب ها از یکدیگر. جدول (۳) پارامترهای قابل تنظیم شبکه عصبی و سطوح هر یک از آن ها را نشان می دهد. با به کارگیری روش تاگوچی، تعداد بررسی های لازم برای طراحی شبکه عصبی مصنوعی، به مقدار قابل توجهی کم شده و زمان و هزینه های آن کاهش می یابد. تعداد آزمایشات به

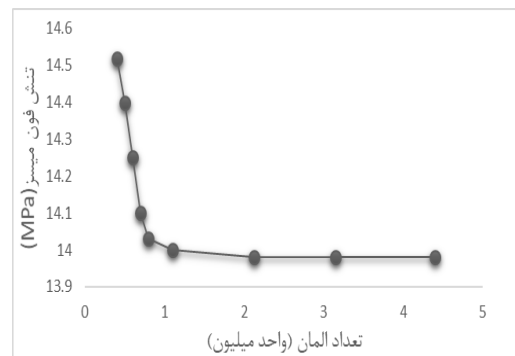


شکل ۴- نمونه ای از شبکه بندی آسیب بر روی زانویی لوله

به منظور دست یافتن به حلی که مستقل از شبکه بوده و تعداد المان ها تأثیری در نتایج آن نداشته باشد، آزمون همگرایی روی نمونه ها انجام گرفت که نتایج آن در شکل های (۵) و (۶) آورده شده است. در آزمون همگرایی برای بخش جامد از مقدار تنش فون میزز ماکزیمم و برای بخش سیال از بیشینه مقدار فشار به عنوان پارامتر معیار بهره گرفته شده است. در مجموع در حالت های مختلف شبیه سازی، بین ۸ تا ۱۹ میلیون المان برای سیال، و بین ۱/۶ تا ۳ میلیون المان برای جامد به کار رفته است.

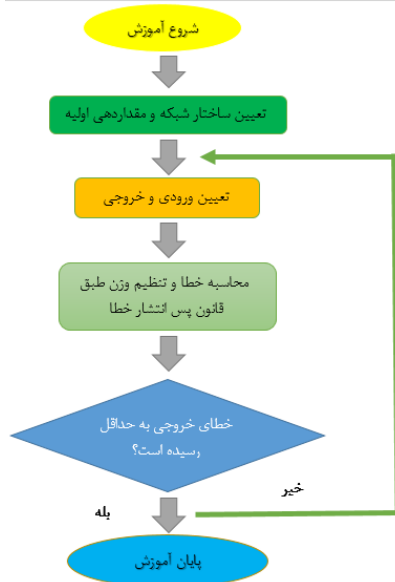


شکل ۵- نتایج آزمون همگرایی شبکه بندی سیال



شکل ۶- نتایج آزمون همگرایی شبکه بندی جامد

در معادله بالا y_i متغیر پاسخ هر آزمایش یا MSE و N تعداد تکرار هر آزمایش است. در مطالعه حاضر، از الگوریتم یادگیری پس انتشار خطا برای بهینه کردن وزن‌های شبکه عصبی و در نتیجه حداقل کردن تابع هزینه^۱ استفاده شده است. فلوچارت شکل (۷) خلاصه این الگوریتم را نشان می‌دهد.



شکل ۷- روندنمای الگوریتم پس از انتشار خطا

کمک این جدول و با توجه به تعداد پارامترهای موثر و تعداد سطوح هر کدام از آن‌ها مشخص می‌شود [۲۰]. در مطالعه حاضر که دارای ۴ پارامتر و ۵ سطح است، تاگوچی آرایه متعامد L25 را پیشنهاد می‌کند. در این مطالعه مقدار خطای میانگین مربعات یا MSE ملاک بهینه بودن شرایط پارامترهای شبکه عصبی قرار خواهد گرفت. مقدار MSE از رابطه (۱) تعیین می‌شود.

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - y_i)^2 \quad (1)$$

در رابطه فوق، N برابر تعداد کل نمونه‌های آموزشی، Y_i برابر مقدار خروجی واقعی و y_i مقدار خروجی شبکه است. در روش تاگوچی تغییرات به نسبت سیگنال به نویز (S/N) تبدیل می‌شود و شرایط آزمایش با حداکثر نسبت S/N به عنوان شرایط مطلوب در نظر گرفته می‌شود [۲۰]. رابطه (۲) نسبت سیگنال به نویز را برای حالتی که کم‌ترین جواب مقدار بهینه است تعیین می‌کند [۲۰]:

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left(\frac{\sum_{i=1}^N y_i^2}{N} \right) \quad (2)$$

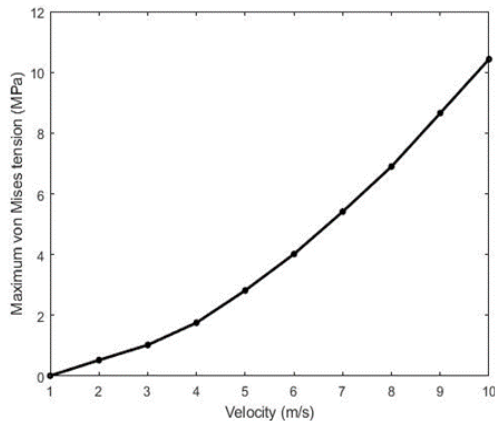
جدول ۳- پارامترها قابل تنظیم شبکه عصبی و سطوح هر یک

پارامترها	سطح اول	سطح دوم	سطح سوم	سطح چهارم	سطح پنجم
تعداد نورون لایه پنهان اول	۳	۵	۷	۹	۱۱
تعداد نورون لایه پنهان دوم	۳	۵	۷	۹	۱۱
نرخ یادگیری	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۰۰۰۱
ضریب وزن‌های اولیه	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۵	۰/۱	۱

در محدوده [-1,1] نرمال‌سازی شده است. عمل نرمال‌سازی مانع از کوچک شدن بیش از حد وزن‌ها و اشباع زود هنگام نورون‌ها می‌شود. بعد از نرمال‌سازی داده‌ها، به منظور آموزش و تست شبکه، داده‌های ورودی با نسبت مشخصی به دو دسته داده آموزش و داده تست، تقسیم بندی خواهند شد. در مطالعه حاضر، این نسبت برابر با ۰/۷ در نظر گرفته شده است [۲۰].

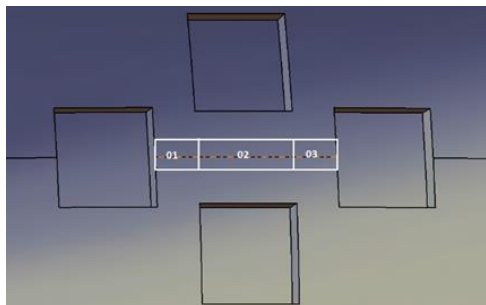
به منظور ساخت شبکه عصبی با الگوریتم پس انتشار خطا، باید ساختار شبکه شامل تعداد ورودی و خروجی، تعداد لایه پنهان و تعداد نورون هر لایه مشخص شود؛ همچنین به منظور پیاده سازی شبکه با الگوریتم پس انتشار خطا، نیاز به مقادیر اولیه وزن‌های لایه‌ها و همچنین مقدار نرخ یادگیری، و نسبت داده آموزش شبکه به کل داده ورودی وجود دارد. با توجه به متفاوت بودن بازه تغییرات ورودی‌ها با هم، این بازه برای همه ورودی‌ها

^۱ cost function



شکل ۹- تاثیر تغییر سرعت سیال بر حداکثر تنش وارد بر لوله

به منظور بررسی بهتر تغییرات تنش در منطقه آسیب دیده، ناحیه بین آسیب‌ها که بر اساس نتایج حاصل، بحرانی‌ترین منطقه از حیث تحمل تنش است، در ادامه مورد بررسی موشکافانه‌تر قرار خواهد گرفت. به منظور بررسی ساده‌تر این ناحیه مطابق با شکل (۱۰) در راستای محور لوله به سه قسمت تقسیم شده است.



شکل ۱۰- ناحیه مورد مطالعه بر روی تغییرات تنش به ازای تغییر سرعت سیال

نحوه توزیع تنش با تغییرات سرعت سیال در ناحیه مذکور در شکل (۱۱) به نمایش در آمده است. مطابق با این شکل بیشترین مقدار تنش، دقیقاً در میانه چهار آسیب جایی ایجاد می‌شود که تعامل و برهمکنش آسیب‌ها بر یکدیگر بیشینه است. ضمن اینکه با توجه به تقارن هندسه آسیب‌ها، توزیع تنش در ناحیه مورد مطالعه نیز تقریباً متقارن است.

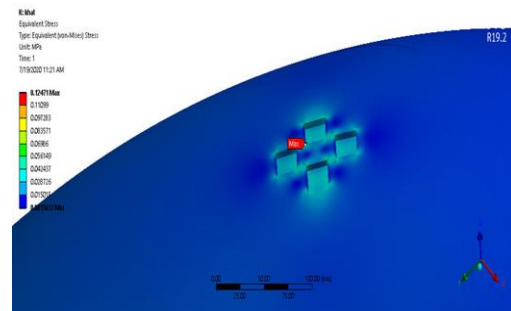
۴- نتایج و بحث

برای حصول اطمینان از دقت مدلسازی انجام شده میزان فشار شکست لوله آسیب‌دیده که با شبیه‌سازی اجزاء محدود بدست آمده با نتیجه تجربی ارائه شده مرجع [۱۶] مقایسه گردیده است. برای هندسه ارائه شده در جدول (۱) و شکل (۱) و سرعت سیال ۰/۶۵ m/s فشار شکست در روش اجزاء محدود ۱۷/۸۵ MPa بدست آمد که با مقدار تجربی ارائه شده در مرجع [۱۶] یعنی ۱۸/۶۶ MPa کمی بیشتر از ۴ درصد اختلاف دارد. این اختلاف اندک نشان از دقت مناسب روش مدلسازی به کار رفته در پژوهش حاضر دارد.

۴-۱- نتایج شبیه‌سازی اجزاء محدود

۴-۱-۱- تاثیر سرعت سیال بر تنش وارد بر لوله

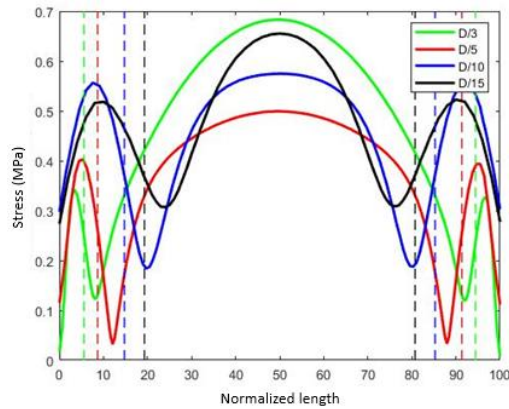
با بررسی مکان رویداد بیشینه تنش وارد بر لوله در سرعت‌های مختلف سیال، مشاهده شد که مطابق با شکل (۸) بیشینه مقدار تنش در همه نمونه‌های مورد بررسی در گوشه‌ای از آسیب‌ها ایجاد می‌شود که در بین چهار آسیب قرار دارد. رخداد بیشینه تنش در گوشه آسیب به دلیل تمرکز تنش و علت وقوع آن در بین چهار آسیب، به دلیل پدیده تعامل آسیب‌ها بر یکدیگر است.



شکل ۸- مکان بیشینه تنش وارد بر لوله در سرعت سیال برابر با 10m/s

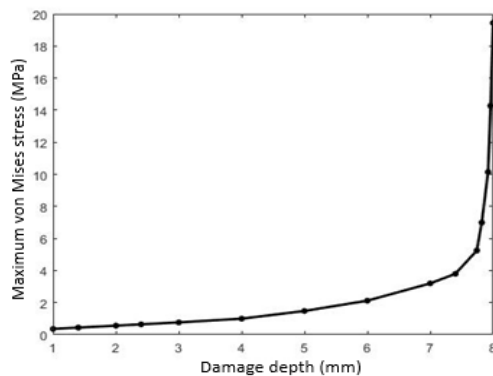
شکل (۹) اثر تغییر سرعت سیال بر حداکثر تنش وارد بر لوله را نشان می‌دهد. مطابق با این شکل با افزایش سرعت سیال، بیشینه مقدار تنش وارد بر لوله افزایش می‌یابد.

روی مسیر تعریف شده در شکل (۱۰) رسم گردید. به منظور مقایسه بهتر، طول مسیر روی محور افقی نرمال شده و نواحی مختلف مسیر با خطوط عمودی از هم جدا شده‌اند.



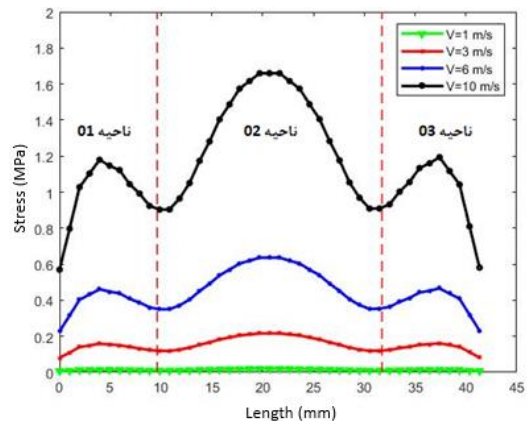
شکل ۱۰- توزیع تنش به ازای تغییر در اندازه آسیب

۴-۱-۳- تأثیر عمق آسیب بر تنش وارد بر لوله
 نمودار تغییرات تنش وان میزز بیشینه وارد بر لوله بر حسب عمق آسیب در شکل (۱۴) نشان داده شده است. مطابق با این نمودار در صورتی که عمق آسیب از ۷ میلی‌متر بیشتر شود بیشینه تنش به شدت افزایش خواهد یافت. این امر نشان‌دهنده ریسک بسیار بالای شکست لوله در صورت ادامه بهره‌برداری از آن با وجود آسیب‌های عمیق است. در حالیکه آسیب‌هایی که اضلاع بزرگ و عمق کمی دارند، چندان خطرناک نیستند.



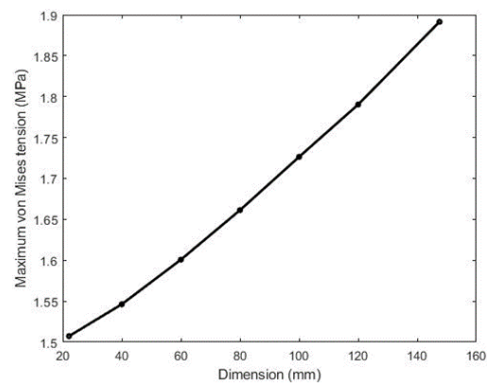
شکل ۱۳- تأثیر افزایش ابعاد آسیب بر حداکثر تنش وارد بر لوله

عمق آسیب نه تنها بر اندازه تنش بیشینه وارد بر لوله تأثیر بسزایی دارد، بلکه محل وقوع آن را هم تغییر می‌دهد. با بررسی مکان رویداد بیشینه تنش وارد بر لوله در عمق‌های مختلف



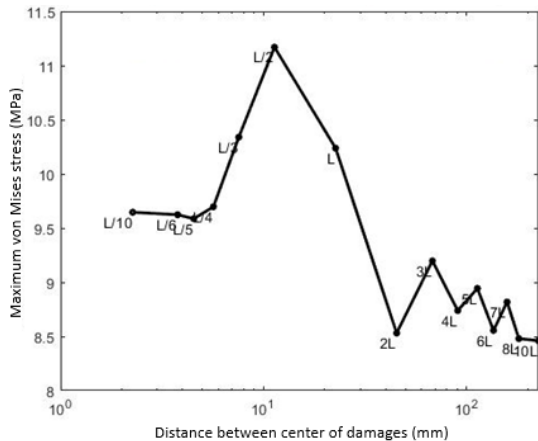
شکل ۱۱- مقایسه تغییرات تنش در سرعت‌های مختلف سیال

۴-۱-۲- تأثیر اندازه آسیب بر تنش وارد بر لوله
 شکل (۱۲) اثر تغییرات اندازه آسیب (اندازه اضلاع مربع) را بر روی مقدار حداکثر تنش وارد بر لوله نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رفت با افزایش اندازه آسیب، بیشینه تنش وارد بر لوله هم افزایش می‌یابد. نکته قابل توجه در این شکل آن است که حتی با چند برابر شدن طول ضلع آسیب، بیشینه تنش وارد بر آن تغییر چندانی نمی‌کند؛ بنابراین آسیب‌هایی که صرفاً مساحت بالایی دارند خطر چندانی برای عملکرد لوله ایجاد نمی‌کنند.



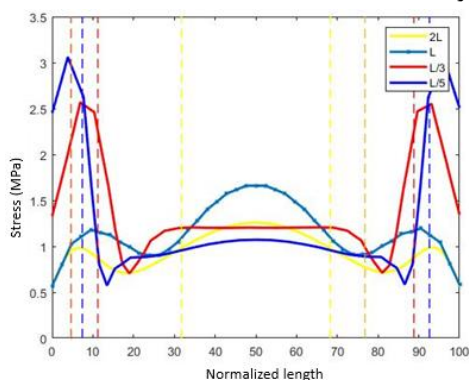
شکل ۱۲- تأثیر افزایش ابعاد آسیب بر حداکثر تنش وارد بر لوله

جهت بررسی تأثیر اندازه آسیب بر توزیع تنش در ناحیه بین آسیب‌ها، مطابق با شکل (۱۳) طول اضلاع آسیب از مقدار یک‌پانزدهم تا یک‌سوم قطر لوله تغییر داده شده و توزیع تنش



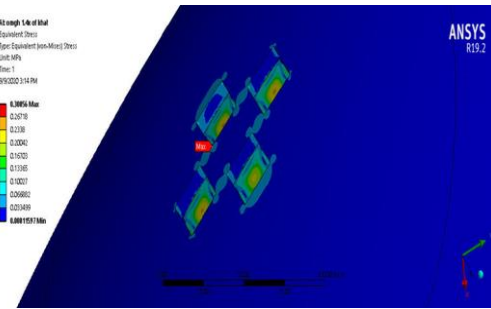
شکل ۱۷- بیشینه تنش وارد بر لوله بر تغییر فاصله آسیب‌ها

علت این رفتار پیچیده، تغییر نحوه تعامل و هم‌افزایی آسیب‌ها با یکدیگر با تغییر فاصله بین آسیب‌هاست. به منظور بررسی بیشتر این امر، نمودار توزیع تنش روی مسیر تعریف شده در شکل (۱۰) برای سرعت $V=10 \text{ m/s}$ در شکل (۱۸) آورده شده است. به منظور مقایسه بهتر، طول مسیر روی محور افقی نرمال شده و نواحی مختلف مسیر با خطوط عمودی از هم جدا شده‌اند. مطابق با شکل (۱۸) وقتی فاصله بین آسیب‌ها بسیار کم باشد بیشترین تنش در نواحی یک و سه از شکل (۱۰) که دو آسیب بسیار نزدیک به هم بیشترین هم‌افزایی را دارند ایجاد می‌شود. با افزایش فاصله به دلیل کاهش تعامل بین آسیب‌های مجاور، نقطه میانی ناحیه دو که دقیقاً وسط چهار آسیب قرار گرفته بدلیل هم‌افزایی همه آسیب‌ها بیشترین تنش را متحمل می‌شود. در نهایت با افزایش هر چه بیشتر فاصله بین آسیب‌ها، تعامل بین آن‌ها کم و کمتر شده و از اندازه تنش کاسته می‌گردد.

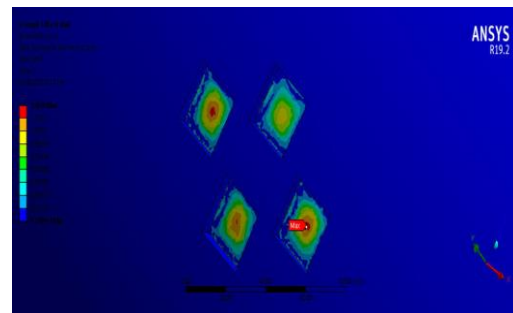


شکل ۱۸- نحوه توزیع تنش با تغییر در فاصله بین آسیب‌ها

آسیب، مشاهده شد که با افزایش عمق آسیب، مکان بیشینه تنش از گوشه آسیب به وسط آن نقل مکان می‌کند؛ بنابراین در حالیکه برای عمق آسیب کم، مطابق با شکل (۱۵)، تنش بیشینه در گوشه آسیب ایجاد می‌شود در عمق آسیب زیاد مطابق با شکل (۱۶)، مرکز آسیب محل وقوع بیشترین تنش است.



شکل ۱۵- مکان بیشینه تنش در عمق آسیب کم



شکل ۱۶- مکان بیشینه تنش در عمق آسیب بالا

۴-۱-۴- تاثیر فاصله آسیب‌ها بر تنش وارد بر لوله

برای بررسی اثر فاصله بین آسیب‌ها بر تنش ایجاد شده در لوله، فاصله مرکز به مرکز بین آسیب‌ها بر اساس طول ضلع آسیب مرجع یعنی $L = 39.6 \text{ mm}$ سنجیده شده است.

نحوه تغییرات تنش ماکزیمم بر حسب فاصله آسیب‌ها در نمودار شکل (۱۷) به نمایش در آمده است. در این نمودار محور افقی بصورت لگاریتمی در نظر گرفته شده است. مطابق با این شکل، با کاهش فاصله بین آسیب‌ها تنش وارد بر لوله ابتدا روندی صعودی و سپس نزولی دارد. ضمن اینکه این روند با نوسانات زیادی همراه بوده و رفتاری پیچیده نشان می‌دهد.

۲-۴- نتایج شبکه عصبی

۴-۲-۱- محاسبه مقادیر میانگین مربعات خطا

برای اطمینان از درستی مقادیر میانگین مربعات خطا، هر آزمایش چندین بار تکرار شده و مقدار میانگین آن در جدول (۴) نوشته شد. با توجه به مقادیر میانگین مربعات خطا، مشخص شد که آزمایش شماره ۹ بهینه‌ترین سطوح پارامتر را در بین ۲۵ آزمایش انجام شده، در اختیار دارد.

۴-۲-۲- تحلیل سیگنال به نویز

نسبت سیگنال به نویز برای سطوح هر پارامتر طراحی به کمک دو نرم‌افزار Minitab و Matlab تعیین و در جدول (۵) گزارش شده است. در این جدول، مقادیر بیشینه هر پارامتر بهینه‌ترین

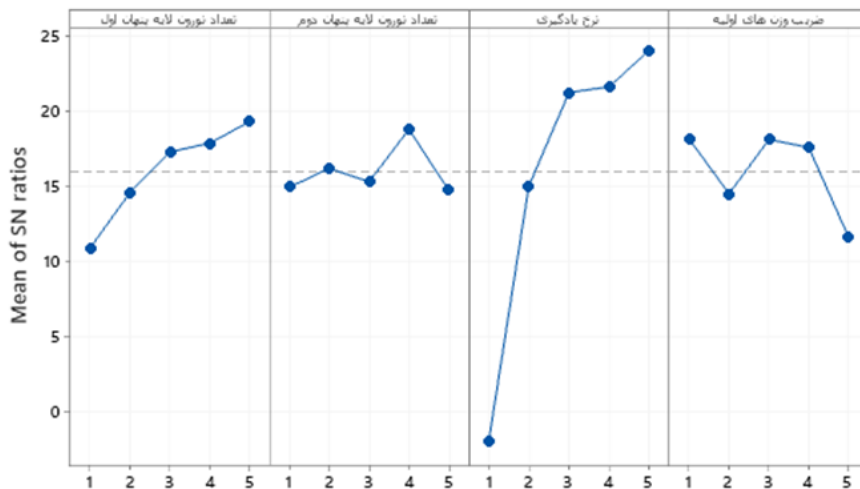
سطح آن و مقدار دلتا اختلاف بین بیشترین و کمترین مقدار سیگنال به نویز برای هر پارامتر را نشان می‌دهد. مقدار رتبه در این جدول، رتبه اهمیت تغییرات هر پارامتر را مشخص می‌کند که با توجه به مقدار دلتا تعیین می‌شود. ضمن اینکه شکل (۱۹) نسبت S/N را برای سطوح پارامترهای مورد بررسی نشان می‌دهد. مطابق با جدول (۵) تغییرات نرخ یادگیری، بیش‌ترین تاثیر را بر نتیجه آزمایش خواهد داشت. تعداد نورون در لایه پنهان اول، ضریب وزن‌های اولیه و تعداد نورون در لایه پنهان دوم، در رتبه‌های بعدی قرار دارند. با توجه به این جدول و شکل (۱۹)، مقادیر سطوح با بیش‌ترین بهره‌وری برای هر پارامتر مطابق با نظرات تاگوچی تعیین می‌شود. جدول (۶) مقادیر پارامترهای بهینه، و مقدار MSE متناظر با آن را نشان می‌دهد.

جدول ۴- مقادیر پارامترها و مقدار میانگین مربعات خطا در هر آزمایش

شماره آزمایش	تعداد نورون لایه پنهان اول	تعداد نورون لایه پنهان دوم	نرخ یادگیری	ضریب وزن‌های اولیه	میانگین مربعات خطا
۱	۳	۳	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۵	۱/۷۷۳
۲	۳	۵	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۱	۰/۶۱۴
۳	۳	۷	۰/۰۰۰۱	۰/۵	۰/۰۷۷۴
۴	۳	۹	۰/۰۰۰۵	۰/۱	۰/۰۷۹
۵	۳	۱۱	۰/۰۰۱	۱	۰/۲۸۴۳
۶	۵	۳	۰/۰۰۰۰۵	۰/۵	۰/۱۹۲۳
۷	۵	۵	۰/۰۰۰۱	۰/۱	۰/۰۶۳۷
۸	۵	۷	۰/۰۰۰۵	۱	۰/۲۷۰۵
۹	۵	۹	۰/۰۰۱	۰/۰۵	۰/۰۳۵۹
۱۰	۵	۱۱	۰/۰۰۰۰۱	۰/۰۱	۱/۸۰۹۲
۱۱	۷	۳	۰/۰۰۰۱	۱	۰/۱۹۳۶
۱۲	۷	۵	۰/۰۰۰۵	۰/۰۵	۰/۰۵۸۷
۱۳	۷	۷	۰/۰۰۱	۰/۰۱	۰/۰۴۲۳
۱۴	۷	۹	۰/۰۰۰۰۱	۰/۵	۰/۸۱۵۵
۱۵	۷	۱۱	۰/۰۰۰۰۵	۰/۱	۰/۱۲۳۹
۱۶	۹	۳	۰/۰۰۰۵	۰/۰۱	۰/۰۶۴۷
۱۷	۹	۵	۰/۰۰۱	۰/۵	۰/۵۰۲
۱۸	۹	۷	۰/۰۰۰۰۱	۰/۱	۱/۵۰۳۵
۱۹	۹	۹	۰/۰۰۰۰۵	۱	۰/۱۰۶۷
۲۰	۹	۱۱	۰/۰۰۰۱	۰/۰۵	۰/۰۶۶۴
۲۱	۱۱	۳	۰/۰۰۱	۰/۱	۰/۰۴۳۵
۲۲	۱۱	۵	۰/۰۰۰۰۱	۱	۰/۷۸۷۶
۲۳	۱۱	۷	۰/۰۰۰۰۵	۰/۰۵	۰/۱۱۴۱
۲۴	۱۱	۹	۰/۰۰۰۱	۰/۰۱	۰/۰۷۸۸
۲۵	۱۱	۱۱	۰/۰۰۰۵	۰/۵	۰/۰۴۹۴

جدول ۵- مقدار نسبت S/N برای سطوح هر پارامتر

سطح	تعداد نورون لایه پنهان اول	تعداد نورون لایه پنهان دوم	نرخ یادگیری	ضریب وزن‌ها
۱	۱۰/۸۹۲	۱۴/۹۲۴	-۱/۹۶۴	۱۸/۱۰۷
۲	۱۴/۵۸۴	۱۶/۱۶۸	۱۴/۹۹۷	۱۴/۴۸۲
۳	۱۷/۲۵۴	۱۵/۲۷۳	۲۱/۲۰۶	۱۸/۰۸۶
۴	۱۷/۸۴۴	۱۸/۷۶	۲۱/۵۵۸	۱۷/۵۵۸
۵	۱۹/۲۷۱	۱۴/۷۱۹	۲۴/۰۱۷	۱۱/۶۱۱
دلتا	۸/۳۷۹	۴/۰۴۱	۲۵/۹۸۲	۶/۴۹۷
رتبه	۲	۴	۱	۳



شکل ۱۹- نسبت سیگنال به نویز برای سطوح هر پارامتر

جدول ۶- مقادیر بهینه طبق پیش‌بینی تاگوچی

MSE	ضریب وزن‌های اولیه	نرخ یادگیری	تعداد نورون لایه پنهان دوم	تعداد نورون لایه پنهان اول
۰/۰۷۲۳۳	۰/۰۵	۰/۰۰۱	۹	۱۱

مقادیر سطوح بهینه هر پارامتر و مقدار MSE حاصل، در جدول (۷) آمده است.

جدول ۷- سطوح بهینه هر پارامتر از مجموع آزمایش‌ها

ضریب وزن‌های اولیه	نرخ یادگیری	تعداد نورون لایه پنهان دوم	تعداد نورون لایه پنهان اول	MSE
۰/۰۵	۰/۰۰۱	۹	۵	۰/۰۳۵۹

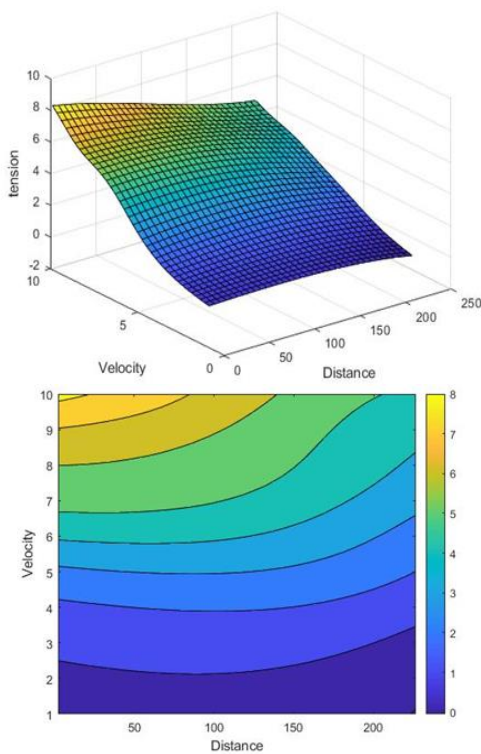
با مشاهده کمترین مقدار میانگین مربعات خطا در جدول (۴) و مقایسه آن با مقدار MSE در جدول (۶) مشخص شد که پیش‌بینی تاگوچی نادرست است؛ بنابراین آزمایش ۹ از جدول (۴) به عنوان پارامترهای دارای بهترین سطوح از بین سطوح مورد آزمایش، انتخاب گردید.

۴-۲-۳- بررسی کیفیت شبکه عصبی مصنوعی

در این مرحله، آزمایش با کمترین مقدار حاصله از میانگین مربعات خطا به عنوان آزمایش با سطوح بهینه انتخاب گردید.

۴-۲-۴- اثر سرعت سیال و فاصله آسیب‌ها بر تنش وارد بر لوله

شکل (۲۱) اثرات ناشی از تغییرات مقدار سرعت سیال و فاصله بین آسیب‌ها بر مقدار تنش وارد بر لوله را با ثابت نگه داشتن مقدار پارامترهای دیگر نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با افزایش مقدار سرعت سیال، اثر برهمکنشی آسیب‌ها افزایش می‌یابد. با رسیدن سیال به سرعت‌های بیشینه، و کاهش فاصله بین آسیب‌ها، مقدار تنش وارد بر لوله افزایش می‌یابد.

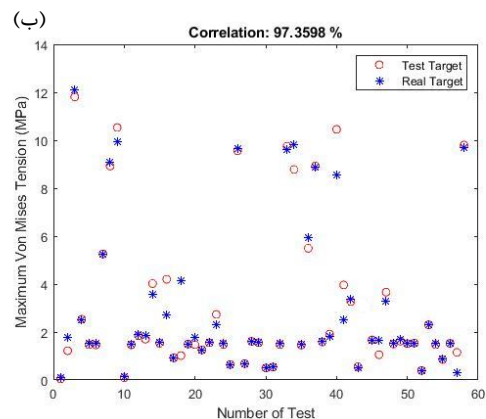
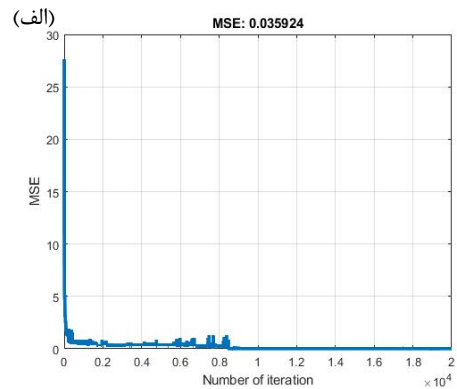


شکل ۲۱- اثر تغییرات سرعت سیال و فاصله بین آسیب‌ها بر تنش وارد بر لوله

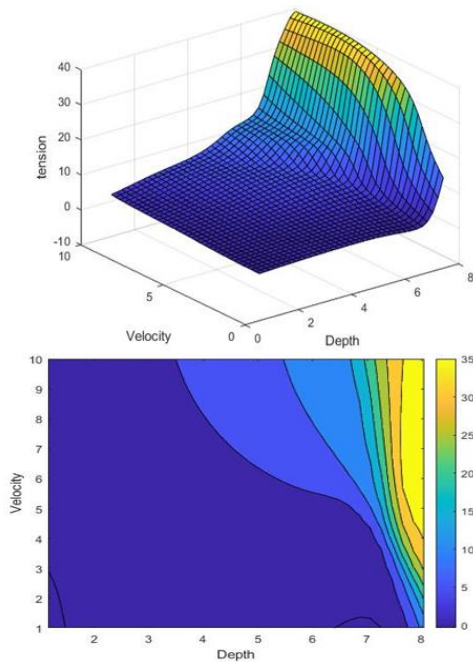
۴-۲-۵- اثر سرعت سیال و اندازه آسیب‌ها بر تنش وارد بر لوله

شکل (۲۲) اثرات ناشی از تغییرات مقدار سرعت سیال و اندازه آسیب‌ها، بر مقدار تنش وارد بر لوله را با ثابت نگه داشتن مقدار پارامترهای دیگر نشان می‌دهد. با افزایش اندازه آسیب‌ها همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقدار تنش در لوله افزایش

شکل (۲۰- الف) روند تغییرات میانگین مربعات خطا را نشان می‌دهد. مقدار MSE بعد از بیست هزار تکرار به عدد ۰/۰۲۱ رسید که نشان دهنده مقدار خطای بسیار ناچیز و نزدیک به صفر است. شکل (۲۰- ب) به مقایسه خروجی حاصل از شبکه عصبی مصنوعی و خروجی واقعی حاصل از حل عددی پرداخته است. مطابق با این شکل، نقاط فوق الذکر، تا حد بسیار خوبی بر یکدیگر منطبق هستند. درصد ضریب همبستگی برای نمودار حاصل از خروجی شبکه عصبی و خروجی حل عددی، بیش از ۹۷ درصد را نشان داده است که این مقدار حاکی از عملکرد مناسب شبکه عصبی مورد استفاده است. شایان ذکر است، هر چه مقدار ضریب همبستگی به یک نزدیک‌تر باشد دقت شبکه عصبی بیشتر خواهد بود. در بسیاری از مقالات پیشین به مقادیر بزرگ‌تر از ۹۰ درصد برای ضریب ضریب همبستگی به عنوان شاخصی از عملکرد مناسب شبکه عصبی استناد شده است [۲۱-۲۳].



شکل ۲۰- نمودار میانگین مربعات خطا (الف) و درصد ضریب همبستگی (ب)

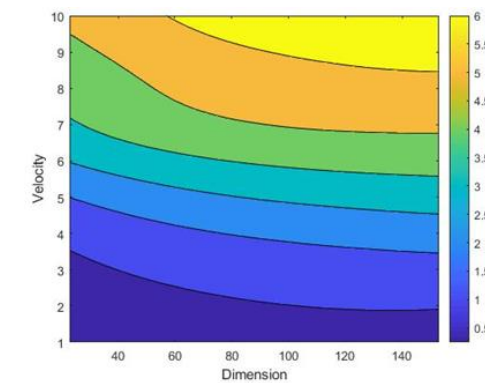
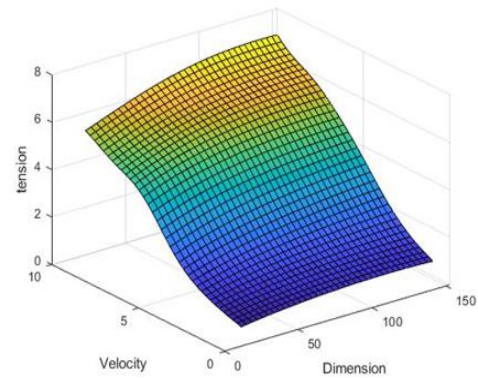


شکل ۲۳- اثر تغییرات سرعت سیال و عمق آسیب‌ها بر تنش وارد بر لوله

۴-۲-۷- اثر اندازه و فاصله آسیب‌ها از هم بر تنش وارد بر لوله

شکل (۲۴) اثرات ناشی از تغییرات مقدار اندازه و فاصله بین آسیب‌ها، بر مقدار تنش وارد بر لوله را با ثابت نگه داشتن مقدار پارامترهای دیگر نشان می‌دهد. مطابق این شکل و مطابق با انتظار، کمترین مقدار تنش برای زمانی است که فاصله آسیب‌ها از یکدیگر زیاد بوده و اندازه آن‌ها کوچک‌ترین مقدار خود را داشته باشد. با افزایش اندازه آسیب‌ها، مقدار تنش نیز افزایش می‌یابد در اندازه‌های آسیب بزرگتر از 85mm، با افزایش فاصله بین آسیب‌ها، مقدار تنش وارد بر لوله، ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. این پدیده اثر برهمکنشی آسیب‌ها بر یکدیگر را نشان می‌دهد.

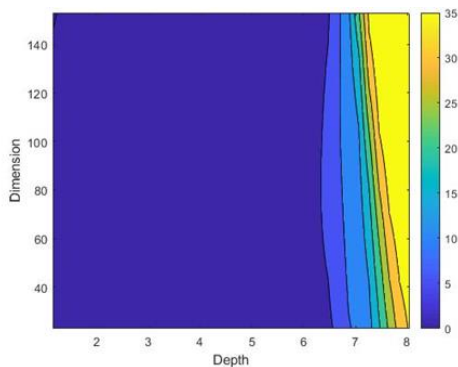
می‌یابد. با افزایش سرعت سیال به بیشینه مقدار خود، مقدار تنش به بیشترین مقدار خود خواهد رسید.



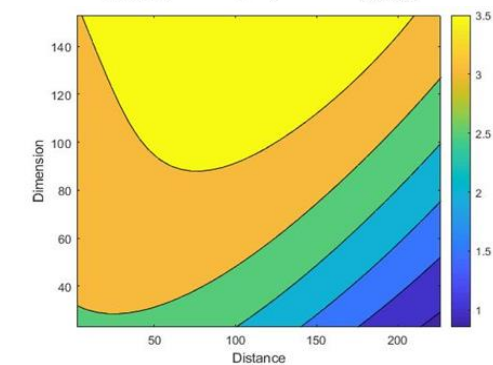
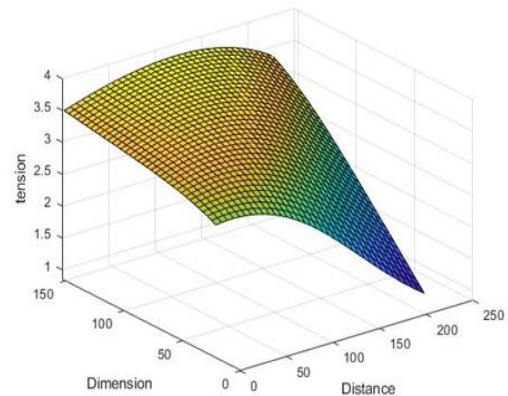
شکل ۲۲- اثر تغییرات سرعت سیال و اندازه آسیب‌ها بر تنش وارد بر لوله

۴-۲-۶- تاثیر سرعت سیال و عمق آسیب‌ها بر تنش وارد بر لوله

شکل (۲۳) اثرات ناشی از تغییرات مقدار سرعت سیال و عمق آسیب‌ها، بر مقدار تنش وارد بر لوله را با ثابت نگه داشتن مقدار پارامترهای دیگر نشان می‌دهد. مطابق شکل، تاثیر افزایش عمق آسیب در افزایش تنش وارد بر لوله در مقادیر عمق زیاد، به حدی است که اثر تغییرات سرعت سیال بر تنش وارد بر لوله، به سختی مشاهده می‌شود.



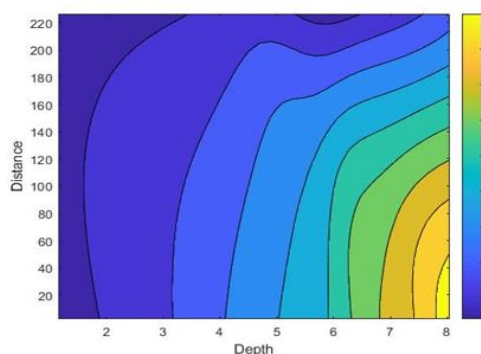
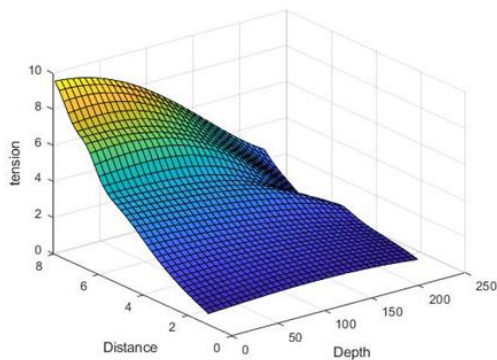
شکل ۲۵- اثر تغییرات اندازه و عمق آسیب‌ها بر تنش وارد بر لوله



شکل ۲۴- اثر تغییرات اندازه و فاصله بین آسیب‌ها بر تنش وارد بر لوله

۴-۲-۹- اثر عمق و فاصله آسیب‌ها از هم بر تنش وارد بر لوله

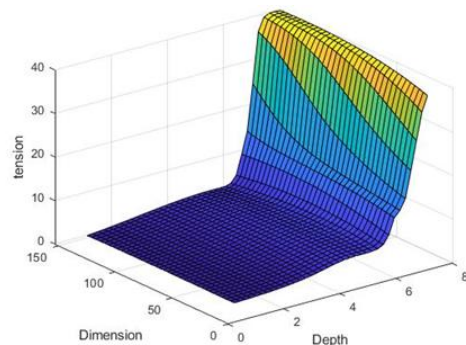
شکل (۲۶) اثرات ناشی از تغییرات مقدار عمق و فاصله بین آسیب‌ها، بر مقدار تنش وارد بر لوله را با ثابت نگه داشتن مقدار پارامترهای دیگر نشان می‌دهد. مطابق انتظار، با افزایش عمق آسیب، مقدار تنش وارد بر لوله افزایش یافته است؛ همچنین کاهش مقدار فاصله بین آسیب‌ها، سبب افزایش مقدار تنش وارد بر لوله شده است.



شکل ۲۶- اثر تغییرات عمق و فاصله بین آسیب‌ها بر تنش وارد بر لوله

۴-۲-۸- اثر اندازه و عمق آسیب‌ها بر تنش وارد بر لوله

شکل (۲۵) اثرات ناشی از تغییرات مقدار اندازه و عمق آسیب‌ها، بر مقدار تنش وارد بر لوله را با ثابت نگه داشتن مقدار پارامترهای دیگر نشان می‌دهد. مطابق شکل، تاثیر افزایش عمق آسیب در افزایش تنش وارد بر لوله در مقادیر عمق زیاد، به حدی است که اثر تغییرات اندازه آسیب‌ها، بر تنش وارد بر لوله، به سختی قابل مشاهده است.



- [7] Netto TA, Ferraz US, Estefen SF (2005) The effect of corrosion defects on the burst pressure of pipelines. *J Constr Steel Res* 61:1185–1204.
- [8] Fekete G, Varga L (2012) The effect of the width to length ratios of corrosion defects on the burst pressures of transmission pipelines. *Eng Fail Anal* 21:21–30.
- [9] Xu LY, Cheng YF (2012) Reliability and failure pressure prediction of various grades of pipeline steel in the presence of corrosion defects and pre-strain. *Int J Press Vessels Pip* 89:75–84.
- [10] Choi K-H, Lee C-S, Ryu D-M, Koo B-Y, Kim M-H, Lee J-M (2016) Comparison of computational and analytical methods for evaluation of failure pressure of subsea pipelines containing internal and external corrosions. *J Mar Sci Technol* 21:369–384.
- [11] Xu W-Z, Li CB, Choung J, Lee J-M (2017) Corroded pipeline failure analysis using artificial neural network scheme. *Adv Eng Softw* 112:255–266.
- [12] Bruère VM, Bouchonneau N, Motta RS, Afonso SMB, Willmersdorf RB, Lyra PRM, Torres JVS, de Andrade EQ, Cunha DJS (2019) Failure pressure prediction of corroded pipes under combined internal pressure and axial compressive force. *J Braz Soc Mech Sci Eng* 41:172.
- [13] Kong D, Huang X, Xin M, Xian G (2020) Effects of defect dimensions and putty properties on the burst performances of steel pipes wrapped with CFRP composites. *Int J Press Vessels Pip* 186:104139.
- [14] Gholami H, Shahrooi S, Shishesaz M (2021) A new approach for prediction of the remaining strength of pipeline with external defects. *Eng Fail Anal* 130:105754.
- [15] Li Y, Sakonder C, Paredes M (2023) Plastic collapse analysis in multiaxially loaded defective pipe specimens at different temperatures. *J Pipeline Sci Eng* 3:100092.
- [16] Benjamin AC, Freire JLF, Vieira RD, Diniz JLC, De Andrade EQ (2005) Burst Tests on Pipeline Containing Interacting Corrosion Defects. 24th Int. Conf. Offshore Mech. Arct. Eng. Vol. 3. ASMEDC, Halkidiki, Greece, pp 403–417
- [17] Vieira RE, Mansouri A, McLaury BS, Shirazi SA (2016) Experimental and computational study of erosion in elbows due to sand particles in air flow. *Powder Technol* 288:339–353.
- [18] Alaei E, Afrasiab H, Dardel M (2020) Analytical and numerical fluid–structure interaction study of a microscale piezoelectric wind energy harvester. *Wind Energy* 23:1444–1460.
- [19] Afrasiab H, Movahhedy MR, Assempour A (2011) Finite element and analytical fluid-structure

۵- نتیجه گیری

در مقاله حاضر از ترکیب مدل سازی اجزاء محدود برهمکنش سازه-سیال و روش شبکه عصبی مصنوعی برای بررسی تنش در لوله های دارای آسیب چندگانه استفاده گردید. نتایج بدست آمده نشان داد، این ترکیب رویکردی مناسب برای پیش بینی شکست در لوله های آسیب دیده حاوی جریان سیال است. بر اساس نتایج حاصل، با افزایش سرعت سیال، ابعاد آسیب، عمق آسیب و کاهش فاصله آسیب ها از هم ریسک شکست لوله افزایش می یابد. ضمناً مشاهده شد، عمق آسیب نسبت به مساحت آن تأثیر بسیار بیشتری بر تنش وارد بر لوله دارد. ضمن اینکه تعامل و هم افزایی آسیب ها نیز پدیده ای بسیار تأثیرگذار بوده و آسیب های چندگانه بویژه وقتی فاصله اندکی داشته باشند بسیار پرخطرتر از آسیب منفرد هستند. مقایسه نتایج بدست آمده از شبکه عصبی با نتایج اجزاء محدود حاکی از انطباق قابل قبول بین نتایج این دو روش بود. با توجه به اینکه استفاده از روش شبکه عصبی زمان تحلیل مسأله را به شدت کاهش می دهد، استفاده از این روش در ترکیب با روش اجزاء محدود برای انجام مطالعه دقیق و سریع روی شکست در لوله های آسیب دیده توصیه می شود.

مراجع

- [1] Weng G, Ding J, Cao J, Hui Y (2023) Experiment and numerical simulation of stress detection for oil and gas pipelines based on magnetic stress coupling of pipeline steel. *Structures* 55:2478–2490.
- [2] Huang Z, Shuai J (2023) Performance evaluation method of oil and gas pipeline integrity management. *J Loss Prev Process Ind* 84:105099.
- [3] Woldesellasse H, Tesfamariam S (2023) Risk analysis of onshore oil and gas pipelines: Literature review and bibliometric analysis. *J Infrastruct Intell Resil* 100052.
- [4] Xie Y, Gao C, Wang P, Qu X, Cui H (2023) Research on vibration fatigue damage identification of oil and gas pipeline under the condition of measured noise injection. *Appl Ocean Res* 134:103512.
- [5] Yao J, Liang W, Xiong J (2022) Novel intelligent diagnosis method of oil and gas pipeline defects with transfer deep learning and feature fusion. *Int J Press Vessels Pip* 200:104781.
- [6] Woldesellasse H, Tesfamariam S (2023) Failure assessment of oil and gas transmission pipelines using an integrated Bayesian belief network and GIS model. *Int J Press Vessels Pip* 205:104984.

- [21] Tahani M, Rabbani A, Kasaeian A, Mehrpooya M, Mirhosseini M (2017) Design and numerical investigation of Savonius wind turbine with discharge flow directing capability. *Energy* 130:327–338.
- [22] Bhavsar PN, Patel JN (2020) Event-based rainfall-run-off modeling and uncertainty analysis for lower Tapi Basin, India. *ISH J Hydraul Eng* 26:353–362.
- [23] Savolainen H, Pfäffli P (1983) Neurotoxicity of furfuryl alcohol vapor in prolonged inhalation exposure. *Environ Res* 31:420–427.
- interaction analysis of the pneumatically actuated diaphragm microvalves. *Acta Mech* 222:175.
- [20] Dikshit MK, Puri AB, Maity A (2017) Modelling and application of response surface optimization to optimize cutting parameters for minimizing cutting forces and surface roughness in high-speed, ball-end milling of Al2014-T6. *J Braz Soc Mech Sci Eng* 39:5117–5133.