



بهینه سازی پروفیل لوله‌های پلی اتیلنی اسپیرال کارگیت و کارگیت با استفاده از شبکه عصبی

مهدی وقاری اسکویی^{۱*}، علی کاشی^۲

۱. واحد تحقیق و توسعه شرکت نشاگستر پردیس

۲. شرکت آکو آب کاسپین و نشاگستر پردیس

*نویسنده مسئول: mahdivaos@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۵ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۹

چکیده

هدف از انجام این تحقیق، به دست آوردن یک پروفیل بهینه برای ساخت یک لوله ترموپلاستیک از جنس پلی اتیلن گرید ۸۰ جهت دستیابی به کمترین میزان وزن ممکن در واحد لوله و در عین داشتن میزان مجاز تغییر قطر بر اساس استاندارد ایزو ۹۹۶۹ می‌باشد. با روش اجزاء محدود به بررسی رفتار ماده در نرم‌افزار انسیس پرداخته شده است. از نظر هندسی نوع لوله‌های مورد بررسی لوله‌های کارگیت و براساس پروفیل قوطی و اسپیرال کارگیت هستند. برای یافتن پروفیل بهینه به صورت دقیق نیاز است تا تعداد حل‌های بالایی از مجموعه گرفته شود، که این فعالیت هزینه بالایی خواهد داشت. بنابراین در این مقاله، با داشتن تعدادی از حل‌های اولیه انتخاب شده به روش انتخاب آزمایش برای توابع وزن و تغییر شکل شبکه عصبی آموزش داده شده است، تا به صورت یک تابع قابل مطالعه باشند. به این صورت که به جای تنظیمات و انجام حل نرم‌افزاری، هر بار برای خروجی گرفتن از میزان وزن مجموعه و یا تغییر شکل در اثر بارگذاری یک تابع در نرم افزار در زمانی کمتر اجرا گردید. از الگوریتم ژنتیک برای بهینه سازی استفاده شده است که از توابع شبکه عصبی توسعه داده شده استفاده نموده و شرایط بهینه وزن را با محدودیت قیدهای تغییر شکل مطابق با استاندارد به دست آورده است.

کلمات کلیدی: پروفیل بهینه، لوله ترموپلاستیک، تحلیل المان محدود، شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک

مقدمه

لوله‌های پلی اتیلنی^۱ به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد خود، از جمله مقاومت بالا در برابر خوردگی، انعطاف‌پذیری، و طول عمر بالا به‌طور گسترده در سیستم‌های انتقال آب و فاضلاب زیرزمینی استفاده می‌شوند. از اوایل دهه ۱۹۶۰ میلادی، پلی اتیلن به عنوان ماده‌ای مناسب برای تولید لوله‌های انتقال سیالات مورد توجه قرار گرفت [۱]. از آن زمان تاکنون، استفاده از این نوع لوله‌ها در پروژه‌های مختلف به دلیل ویژگی‌های فنی و اقتصادی، پیوسته افزایش یافته است. با نظر به کاربرد گسترده لوله‌ها با هندسه‌های کارگیت و کارگیت اسپیرال در شبکه‌های انتقال آب و فاضلاب، بهینه سازی و اطمینان از عملکرد آن‌ها با استفاده از استانداردها بسیار حایز اهمیت می‌باشد. استاندارد ایزو ۹۹۶۹ جهت تعیین فنریت لوله‌ها کاربرد دارد و روابطی برای میزان تغییر قطر لوله‌ها بر اساس نیروی وارده، ارایه می‌نماید [۲]. در پژوهش مورالس و همکاران [۳] به بررسی خواص مکانیکی لوله‌های تولید شده از پروفیل‌های پلی اتیلن، پرداخته شده است. آنها دو روش آزمایشگاهی و شبیه‌سازی با استفاده از نرم‌افزار انسیس، برای به دست آوردن میزان ضریب فنریت لوله به کار گرفتند. تست آزمایشگاهی استفاده شده برای استخراج ضریب فنریت لوله از آزمایش استاندارد ایزو ۹۹۶۹ بوده است. کفسی [۴] بهینه‌سازی هندسی لوله‌های پلی اتیلن مدفون به‌صورت تحلیل پارامتریک انجام داد. انجام تحلیل پارامتریک برای بهینه‌سازی، به دلیل تعداد حل‌های بالا و عدم پوشش بازه به صورت پیوسته، یک ضعف حساب می‌شود. در این پژوهش، سعی شده تا با استفاده از شبکه عصبی توابعی به مقادیر وزن لوله، که تابع هدف مسئله است و میزان تغییر قطر ناشی از اعمال بار، که قید مسئله است اعمال شوند تا توابعی پیوسته در الگوریتم بهینه‌سازی بررسی شوند. روش شبکه عصبی لوببرگ-مارکوارت [۵] یک روش بر مبنای کمینه‌سازی مجموع مربعات خطا،

^۱ Polyethylene (PE)

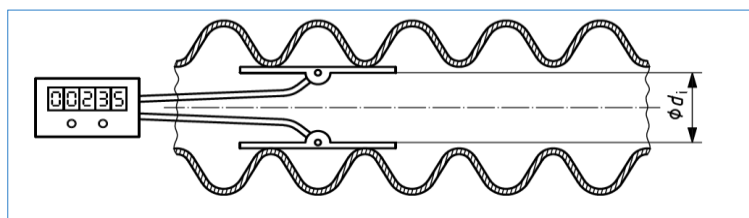


برای یافتن ثوابت برازش است. پاجی و همکاران [۶] از این روش، برای یافتن مقاومت بتن در پژوهش خود، بهره بردند. از مزایای ذکر شده برای این روش شبکه عصبی، ترکیب دو روش کلاسیک گاوس-نیوتون و گرادیان کاهشی است که باعث می‌شود سریع‌تر از روش گاوس-نیوتون به همگرایی رسیده و پاسخ‌هایی دقیق‌تر از روش گرادیان کاهشی ارائه دهد. در این پژوهش حاضر از این روش شبکه عصبی برای انجام برازش تابع هدف، بر روی مقادیر موجود استفاده گردیده است. مشکور و همکاران [۷] با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک و جستجوی الگویی، به بهینه‌سازی پروفیل در محل اتصال لوله‌های پلی‌اتیلن سنگین، برای بهبود استحکام این لوله‌ها در یک فرآیند جوش کاری پرداختند. الگوریتم ژنتیک از جمله الگوریتم‌های نوین برای بهینه‌سازی است. در این الگوریتم بر خلاف الگوریتم‌های کلاسیک، بر مبنای گرادیان، در شروع به جای یک نقطه، از دسته‌ای از نقاط، آغاز به جستجو بر اساس مقادیر خروجی تابع می‌نماید و احتمال کمتری دارد، که در نقاط بهینه محلی و پاسخ‌های کاذب به دام بیفتد [۸].

در استاندارد ایزو ۹۹۶۹ روش انجام آزمایش به این نحو است که با قرار دادن لوله در بین دو صفحه و ثابت نگه‌داشتن صفحه پایینی، صفحه بالایی با سرعت تعیین شده در جدول (۱) به میزان قطر لوله شروع به حرکت در جهت فشردن لوله خواهد نمود و قطر داخلی لوله بر اساس شکل (۱) اندازه‌گیری خواهد شد. بر مبنای عدد ذکر شده در استاندارد این میزان جابه‌جایی صفحه تا رسیدن به عدد تغییر شکل معین از قطر لوله ادامه خواهد داشت. در واقع این آزمایش یک نیرویی را طی زمان یک دقیقه به تدریج به بدنه لوله اعمال می‌کند. این آزمایش، قیدی برای پذیرش پروفیل‌های به دست آمده از بهینه‌سازی خواهد بود؛ به این صورت که با داشتن مقادیر ضریب فنری لوله، میزان مجاز تغییر قطر (سه درصد) و قطر لوله، میزان نیروی وارده بیشینه تعیین می‌شود. سپس هنگام طراحی پروفیل، با وارد کردن این نیرو، بیشینه تغییر قطر قرائت شده و در صورت بیشتر بودن از میزان ۳ درصد، که میزان تغییرات تعیین شده در استاندارد است، طراحی پذیرفته نخواهد شد. نتیجه به دست آمده از این مقاله به این صورت بوده که در صورت تنظیم خواص مواد به صورت دقیق و یکسان، پاسخ اخذ شده از آزمایش و شبیه‌سازی تطابق مناسبی با یکدیگر داشته‌اند. در پژوهش حاضر نیز از نرم‌افزار انسیس برای تحلیل مسئله استفاده خواهد شد. در این پژوهش نیز با استفاده از شبکه عصبی پاسخ‌هایی به جای استفاده از آزمایشات هزینه‌بر، برای شناسایی رفتار سیستم استفاده شده است. خروجی به دست آمده از الگوریتم ژنتیک در این مقاله، خروجی بهتری را به نسبت الگوریتم جستجوی الگویی، ارائه داده است. در پژوهش حاضر نیز بر اساس همین الگوریتم، یافتن مقادیر بهینه برای ساخت پروفیل، استخراج خواهد شد.

جدول ۱: میزان سرعت تغییر قطر بر اساس قطر داخلی لوله [۲]

سرعت تغییر قطر (میلی‌متر بر دقیقه)	قطر داخلی لوله تحت تست (میلی‌متر)
2 ± 1	$d_i \leq 100$
5 ± 0.25	$100 < d_i \leq 200$
10 ± 0.5	$200 < d_i \leq 400$
20 ± 1	$400 < d_i \leq 710$
$0.3 \times d_i \pm 5\%$	$d_i > 710$

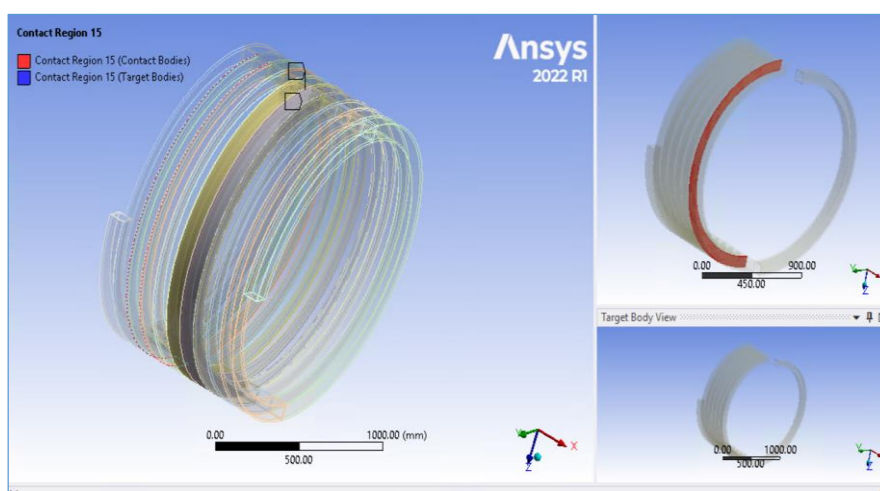


شکل ۱: اندازه‌گیری تغییرات قطر داخلی لوله در هنگام آزمایش [۲]

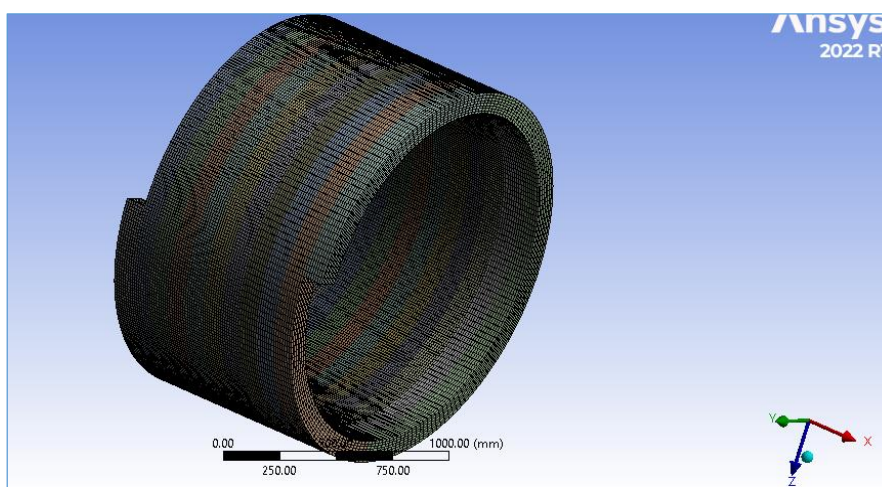


روش انجام پژوهش و شبیه‌سازی

در ابتدا، برای انجام این پژوهش، یک مدل شبیه‌سازی برای حل مسئله در نرم‌افزار انسیس توسعه داده شده است. این مدل با حل مقادیر تنش و تغییر شکل، مقدار تغییر شکل بیشینه در راستای قطر را به ازای نیروی وارده به صورت خروجی ارائه می‌دهد. همچنین در قسمت هندسه تولید شده، با اعمال ماده PE80 می‌توان میزان وزن بر واحد متر لوله را خروجی گرفت. در ادامه نحوه تولید هندسه، شبکه و شرایط مرزی ارائه خواهند شد. هندسه مسئله در حالت کارگیت، با استفاده از کشیدن یک مستطیل با ضخامت معین و چرخاندن آن حول یک محور، تا رسیدن به میزان طول لوله برابر با یک متر و با فرض قطر داخلی ۱۶۰۰ میلی‌متر ایجاد می‌گردد. میزان چرخاندن این پروفیل در طول یک متر، به صورتی انجام شده است تا فاصله ناچیزی بین حلقه‌های ایجاد شده ناشی از چرخش به وجود بیاید تا به هندسه اصلی نزدیک‌تر باشد. بین حلقه‌های ایجاد شده حاصل از چرخش پروفیل در نرم افزار، صفحات تماس تعریف شده و نوع تماس از جنس باند شده در نظر گرفته شده است، تا اتصال دائم این حلقه‌ها به هم، که در واقعیت نیز با جوشکاری انجام می‌شود به خوبی در نظر گرفته شود. در شکل‌های (۲) و (۳) نمونه هندسه و شبکه‌بندی مورد استفاده ارائه شده است. سعی گردیده است تا برای انتقال منظم اطلاعات بر روی شبکه، از شبکه‌بندی ساختار یافته و البته با میزان ابعاد سلول ریز، استفاده شود تا جهت‌گیری‌های نیروها، به خوبی مورد بررسی قرار گیرد.



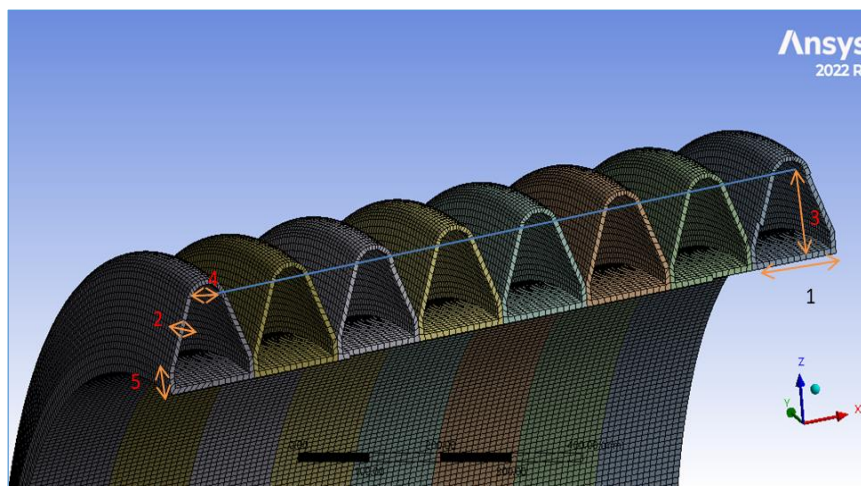
شکل ۲: هندسه رسم شده برای حالت کارگیت به همراه اعمال اتصال صفحات در نرم‌افزار



شکل ۳: شبکه‌بندی مورد استفاده برای هندسه کارگیت



شکل (۴) پروفیل شبکه‌بندی شده در لوله اسپیرال کارگیت را نشان می‌دهد. در این شکل، پنج پارامتر به ترتیب نام‌گذاری شدند که برای تعریف این هندسه ضروری هستند و به ترتیب نام‌گذاری در ادامه مورد استفاده قرار خواهند گرفت. برای لوله کارگیت تنها پارامترهای عرض و طول مستطیل و ضخامت یکنواخت پروفیل برای تعریف هندسه کافی هستند. توضیح اینکه پارامتر چهارم قطر دایره است و پارامتر دوم ضخامت ثابتی برای پروفیل است (بخش بالایی انحنادار).



شکل ۴: هندسه ایجاد شده برای لوله کارگیت اسپیرال

در جدول (۲) خواص مواد لوله استفاده شده در تحلیل نرم‌افزار ارائه می‌گردد.

جدول ۲: خواص ماده استفاده شده برای لوله (PE 80)

خاصیت	نماد	مقدار	واحد
چگالی	ρ	۹۵۰	کیلوگرم بر مترمکب
مدول یانگ	E	۷۹۲	مگاپاسکال
تنش تسلیم	σ_y	۲۲	مگاپاسکال
حد دوام	σ_u	۳۵	مگاپاسکال
ضریب پواسون	ν	۰,۴۵	(بی بعد)

برای به دست آوردن میزان نیروی مورد نیاز، با در نظر گرفتن میزان فنریت لوله برابر با ۸ کیلوپاسکال و با داشتن میزان تغییر قطر مجاز لوله، در هر زمان تا پایان آزمایش و با استفاده از رابطه (۱)، میزان نیروی مورد نیاز (در هر زمان از آزمایش) به دست خواهد آمد [۲]:

$$S = \frac{(0.0186 + \frac{0.025y}{d})F}{Ly} \times 10^6 \quad (1)$$

در این رابطه y میزان تغییرات قطر بر حسب میلی‌متر، L طول لوله بر حسب میلی‌متر، F نیروی وارده بر حسب کیلونیوتن و d میزان قطر است. برای محاسبه y ، با توجه به داشتن قطر لوله برابر با ۱۶۰۰ میلی‌متر، مطابق با جدول (۱)، تغییرات مجاز قطر به میزان ۳ درصد قطر پیروی خواهد کرد. پس با داشتن y به راحتی می‌توان در هر زمان نیرو را به دست آورد. جدول (۳) مقادیر تغییر قطر حالت استاندارد و نیروی متناظر بر حسب زمان ارائه می‌دهد که برای بررسی قید تغییر قطر از این روند اعمال نیرو، در نرم‌افزار استفاده می‌گردد. لازم به ذکر است که در آزمایش قید شده این نیرو در مدت زمان ۶۰ ثانیه به قطعه وارد می‌شود، لذا اعمال نیروی محاسبه شده به ازای این زمان در نظر گرفته می‌شود. این نیرو در راستای شعاعی لوله و از بالا

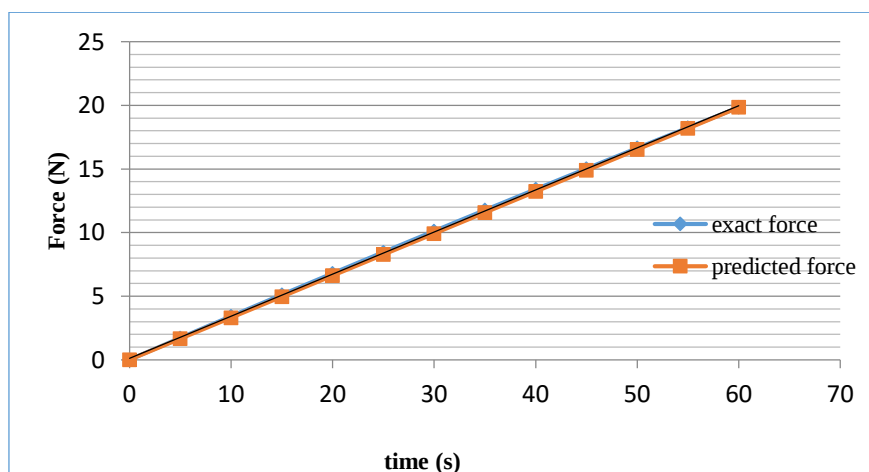


وارد خواهد شد و قسمت پایین لوله، در راستای یک خط و به صورت تکیه‌گاه ثابت معادل فک ثابت نگهدارنده در آزمایش در نظر گرفته می‌گردد.

جدول ۳: میزان تغییر قطر بر حسب زمان به همراه مقادیر نیروی حقیقی و نیروی خطی تخمین زده شده

نیروی تخمین زده (کیلو نیوتن)	نیرو (کیلو نیوتن)	y (میلی‌متر)	زمان (ثانیه)
۰	۰	۰	۰
۱/۶۵	۱۰/۷۱	۴	۵
۳/۳۱	۳/۴۲	۸	۱۰
۴/۹۶	۵/۱۱	۱۲	۱۵
۶/۶۱	۶/۷۹	۱۶	۲۰
۸/۲۷	۸/۴۶	۲۰	۲۵
۹/۹۲	۱۰/۱	۲۴	۳۰
۱۱/۵۷	۱۱/۸	۲۸	۳۵
۱۳/۲۲	۱۳/۴	۳۲	۴۰
۱۴/۹	۱۵/۰	۳۶	۴۵
۱۶/۵۳	۱۶/۶	۴۰	۵۰
۱۸/۲	۱۸/۲	۴۴	۵۵
۱۹/۸	۱۹/۸	۴۸	۶۰

در جدول (۳) همچنین با فرض یک تابع کاملاً خطی مقادیر نیرو محاسبه شده با مقدار واقعی نیرو مقایسه گردیده، که با توجه به تفاوت اندک از مقادیر نیروی خطی‌سازی شده استفاده شده است. در شکل (۵) میزان نیروی تخمین زده شده با روش خطی در کنار مقادیر حقیقی رسم شده‌اند.



شکل ۵: تفاوت نمودارهای حقیقی اعمال نیرو و میزان تخمین زده شده با تابع خطی

برای به دست آوردن پروفیل بهینه در ابتدا لازم است تا تابعی توسعه داده شود که بتوان با داشتن مقادیر پارامترهای ذکر شده، مقادیر وزن و تغییر قطر ناشی از بارگذاری را محاسبه نمود. میزان وزن تابع هدف بهینه سازی بوده و مقدار تغییر قطر قید این مسئله خواهد بود. برای این کار از روش شبکه عصبی در نرم‌افزار متلب استفاده شده است. به منظور توسعه شبکه عصبی لونیبرگ-مارکوارت در ابتدا لازم است تا تعدادی حل موجود باشد که با داشتن پارامترها میزان وزن و تغییر قطر مشخص گردد که بتوان با آن شبکه عصبی را آموزش داد. به این منظور در لوله کارگیت به دلیل کم بودن تعداد پارامترها (سه



مورد) با داشتن تعداد ۴۶ حل این روند انجام شده است. طبق مرجع [۹] حداقل تعداد کافی برای آموزش شبکه عصبی برابر با ۱۰ برابر تعداد پارامترهای مورد مطالعه است. در این مسئله در لوله کارگیت تعداد پارامترهای استفاده شده برابر با سه مورد بوده که در نتیجه میزان ۳۰ داده برای آموزش شبکه عصبی کافی است، اما به جهت اطمینان بالاتر از تعداد داده بیشتر برای کاهش خطا استفاده شده است. در لوله کارگیت اسپیرال به دلیل بالاتر بودن تعداد پارامترهای مورد نیاز برای تعریف هندسه، از روش انتخاب آزمایش برای انتخاب نمونه لازم، برای آموزش شبکه عصبی استفاده شده است. روش انتخاب آزمایش استفاده شده در نرم‌افزار انسیس، روش لاتین هایپرکیوب بوده است. عملکرد این روش به این صورت است که بر اساس محدوده تعیین شده برای هر پارامتر، ترکیبی مناسب را مشخص می‌کند، تا پوشش خوبی از بازه را در بر بگیرد. به این ترتیب توابع استفاده شده شبکه عصبی، داده‌های کامل‌تر و با پوشش بهتری از محدوده را خواهند داشت و در نتیجه خروجی دقیق‌تری را ارائه خواهند نمود. لازم به ذکر است که برای آموزش شبکه عصبی هر دو لوله، از ۱۶ درصد داده‌های اولیه به عنوان آزمون و ۱۶ درصد دیگر به عنوان اعتبارسنجی استفاده شده است. داده‌های آزمون برای تنظیم ضرایب رگرسیون داده‌ها استفاده می‌شوند [۱۰]. الگوریتم استفاده شده برای بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک بوده است. از جمله مزایای استفاده از این الگوریتم عدم وابسته بودن تابع هدف به گرادیان توابع است و الگوریتم کمتر در گیر پاسخ‌های بهینه محلی می‌شود. تعداد جمعیت استفاده شده برای حل، برابر با ۵۰ عدد بوده و بیشینه تعداد نسل‌های تولیدی ۱۰۰ برابر پارامترهای مسئله یعنی ۵۰۰ عدد، در نظر گرفته شده است. این مورد خود در واقع معیاری برای توقف الگوریتم است. برای حل بهینه‌سازی با این روش میزان تیرانس همگرایی در نظر گرفته شده برای پاسخ الگوریتم برابر با 10^{-6} برای مقدار تابع هدف بوده است.

قید تعیین شده غیرخطی، قید تغییر شکل لوله بر اساس استاندارد در نظر گرفته شده است. تابع انتخاب برای تولید نسل‌های بعدی از داده‌های نسل موجود، یک تابع تصادفی بر اساس پیش‌فرض نرم‌افزار متلب است، که با استفاده از این نوع تابع، احتمال ایجاد مقادیر بهینه محلی کاهش می‌یابد. برای جابه‌جایی در رشته مولد و برای تولید نسل بعد، از تابع میانی نرم افزار متلب استفاده شده است. این تابع برای تولید نسل بعد از ترکیب وزن‌دار مولدها استفاده می‌کند. تابع جهش استفاده شده از روش تطبیق‌پذیر برای ایجاد تغییر در رشته اعداد استفاده می‌نماید. به صورت کلی ایجاد جهش در رشته اعداد، برای بررسی جامع‌تر از محدوده تحت مطالعه، پیشنهاد می‌گردد. از مزایای ایجاد جهش به این روش، کاهش شانس حذف موارد با نمره بالاتر، در رشته پارامترها است [۱۱ و ۱۲]. محدوده تغییر پارامترها در الگوریتم ژنتیک، برای بهینه‌سازی هندسه لوله کارگیت و کارگیت اسپیرال بر مبنای شکل (۴)، به ترتیب در جداول (۴) و (۵) در ادامه ارائه شده‌اند.

جدول ۴: بازه تغییرات پارامترهای طراحی لوله کارگیت

پارامتر	محدوده	واحد
طول مستطیل پروفیل	۸۰-۱۴۰	میلی‌متر
عرض مستطیل پروفیل	۷۰-۱۰۰	میلی‌متر
ضخامت پروفیل	۸-۱۲	میلی‌متر

جدول ۵: بازه تغییرات پارامترهای طراحی لوله کارگیت اسپیرال بر مبنای شکل (۴)

شماره پارامتر	محدوده	واحد
۱	۱۰۰-۱۴۰	میلی‌متر
۲	۵-۱۰	میلی‌متر
۳	۸۰-۱۳۰	میلی‌متر
۴	۴۰-۸۰	میلی‌متر
۵	۱۰-۵۰	میلی‌متر



نتایج و بحث

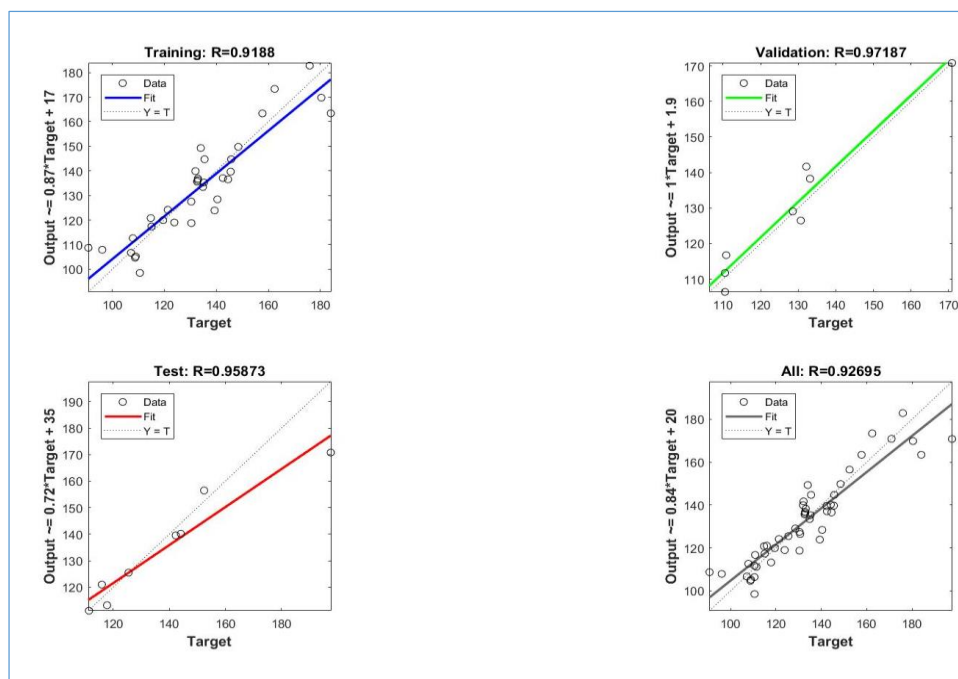
نتایج برای لوله کارگیت اسپیرال

جدول ۶: خروجی مقادیر انتخاب شده روش لاتین هایلرکیوب برای آموزش شبکه عصبی در لوله کارگیت اسپیرال

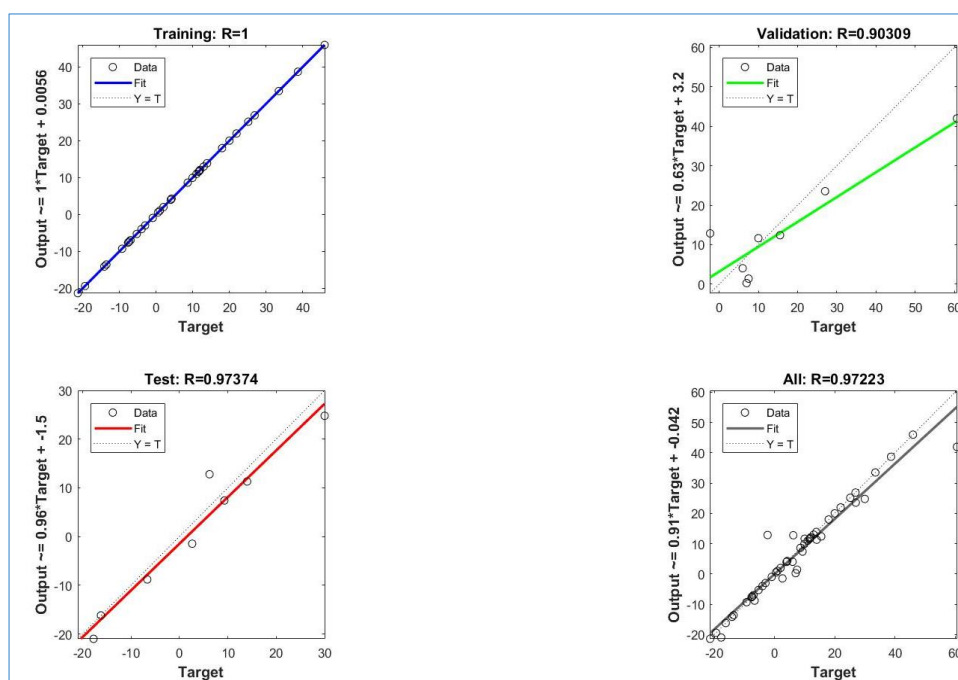
وزن (kg)	تغییر قطر (mm)	پارامتر ۵ (mm)	پارامتر ۴ (mm)	پارامتر ۳ (mm)	پارامتر ۲ (mm)	پارامتر ۱ (mm)	شماره
۱۳۰.۴	۴۷.۱	۲۱.۶	۴۴.۲	۱۲۳.۷	۵.۳	۸۹.۶	۱
۱۲۵.۲	۵۶.۶	۱۲.۰	۵۰.۲	۹۸.۵	۷.۶	۱۰۴.۰	۲
۱۳۲.۹	۵۹.۶	۴۸.۷	۵۳.۲	۹۵.۴	۷.۹	۱۱۴.۰	۳
۱۱۰.۵	۶۳.۵	۳۷.۷	۴۳.۸	۱۱۹.۹	۵.۶	۱۲۱.۷	۴
۱۰۸.۷	۷۰.۰	۳۰.۹	۷۰.۲	۸۶.۹	۵.۲	۱۰۰.۴	۵
۱۱۴.۸	۴۸.۵	۲۲.۳	۷۵.۳	۱۰۹.۳	۵.۴	۱۱۷.۴	۶
۱۸۰.۴	۳۰.۳	۲۹.۱	۷۹.۶	۱۱۳.۵	۸.۵	۱۰۲.۱	۷
۱۳۴.۰	۵۴.۲	۱۷.۲	۴۷.۲	۱۰۸.۲	۹.۰	۱۳۷.۰	۸
۱۴۸.۴	۴۰.۳	۳۳.۴	۴۳.۰	۱۲۶.۳	۸.۰	۱۱۶.۶	۹
۱۱۰.۸	۵۷.۹	۴۷.۹	۷۱.۱	۱۰۲.۹	۶.۱	۱۳۶.۲	۱۰
۱۱۷.۹	۷۳.۲	۳۸.۵	۶۰.۹	۸۲.۷	۶.۸	۱۰۷.۲	۱۱
۱۷۰.۹	۳۳.۸	۴۷.۰	۴۶.۴	۱۲۷.۳	۸.۶	۱۰۴.۷	۱۲
۱۲۵.۵	۸۶.۷	۲۴.۰	۴۴.۷	۸۴.۸	۸.۲	۱۰۹.۸	۱۳
۱۴۰.۴	۴۱.۴	۳۱.۷	۶۵.۱	۱۱۱.۴	۶.۶	۱۰۳.۸	۱۴
۱۹۷.۵	۲۶.۶	۱۳.۸	۷۸.۷	۱۲۳.۱	۹.۹	۱۱۳.۲	۱۵
۹۰.۸	۱۰۸.۶	۱۴.۷	۵۸.۳	۸۳.۷	۵.۱	۱۲۳.۴	۱۶
۱۲۳.۸	۷۸.۰	۲۷.۴	۴۱.۳	۹۴.۴	۷.۵	۱۰۸.۹	۱۷
۱۱۰.۶	۸۱.۵	۱۸.۱	۵۰.۶	۹۰.۱	۷.۳	۱۳۱.۱	۱۸
۱۳۲.۲	۷۴.۹	۴۰.۲	۵۹.۱	۸۱.۶	۹.۵	۱۲۹.۴	۱۹
۱۱۶.۰	۵۸.۰	۴۶.۲	۶۲.۶	۱۰۱.۸	۶.۲	۱۲۰.۹	۲۰
۱۶۲.۴	۴۵.۷	۴۴.۵	۶۶.۸	۹۳.۳	۹.۲	۱۰۳.۰	۲۱
۱۴۴.۵	۵۰.۰	۱۸.۹	۵۶.۶	۱۰۰.۷	۷.۷	۱۰۱.۳	۲۲
۱۸۴.۰	۳۱.۸	۱۹.۸	۵۲.۳	۱۲۸.۴	۹.۸	۱۱۲.۳	۲۳
۱۳۲.۶	۴۰.۶	۳۵.۱	۵۵.۷	۱۲۹.۵	۷.۱	۱۳۱.۹	۲۴
۱۳۴.۸	۶۲.۰	۲۱.۵	۶۳.۴	۸۹.۰	۹.۷	۱۳۷.۹	۲۵
۱۷۵.۹	۲۸.۶	۴۱.۹	۷۷.۰	۱۲۱.۰	۸.۱	۱۰۵.۵	۲۶
۱۱۰.۵	۶۶.۰	۴۱.۱	۵۴.۹	۱۰۶.۱	۶.۰	۱۲۶.۰	۲۷
۱۵۷.۷	۴۱.۰	۲۶.۶	۴۸.۱	۱۱۶.۷	۹.۴	۱۲۰.۰	۲۸
۱۰۷.۹	۶۰.۰	۱۱.۳	۶۷.۷	۱۰۵.۰	۵.۷	۱۲۸.۵	۲۹
۱۲۵.۵	۴۹.۰	۱۲.۱	۴۸.۹	۱۱۸.۸	۷.۶	۱۲۲.۶	۳۰
۱۳۲.۰	۴۵.۰	۲۵.۷	۶۹.۴	۱۲۴.۱	۷.۲	۱۲۸.۷	۳۱
۱۳۲.۹	۵۲.۰	۴۹.۶	۷۲.۸	۹۶.۵	۷.۰	۱۱۰.۶	۳۲
۱۰۷.۲	۶۸.۰	۱۶.۴	۷۴.۵	۹۲.۲	۵.۹	۱۲۶.۸	۳۳
۱۲۱.۳	۵۲.۲	۱۳.۰	۶۶.۰	۱۰۷.۱	۶.۹	۱۳۰.۲	۳۴
۱۵۲.۴	۴۲.۷	۲۰.۶	۵۴.۰	۱۱۲.۴	۸.۷	۱۱۴.۹	۳۵
۱۳۹.۳	۵۲.۰	۲۸.۳	۷۶.۲	۹۱.۲	۹.۱	۱۳۲.۸	۳۶
۱۳۳.۱	۷۵.۰	۱۵.۵	۵۷.۴	۸۰.۵	۸.۹	۱۱۱.۵	۳۷
۱۴۴.۲	۴۴.۰	۱۰.۴	۶۱.۷	۱۱۰.۳	۷.۴	۱۰۸.۱	۳۸
۱۳۰.۴	۵۵.۰	۳۲.۶	۶۴.۳	۹۸.۶	۸.۴	۱۲۵.۳	۳۹
۱۳۰.۷	۶۱.۹	۴۲.۸	۷۱.۹	۸۵.۹	۸.۸	۱۳۴.۵	۴۰
۱۰۹.۰	۵۹.۰	۳۶.۰	۴۵.۵	۱۱۵.۶	۵.۵	۱۱۹.۱	۴۱
۱۴۲.۵	۳۸.۷	۴۳.۶	۷۳.۶	۱۲۵.۲	۷.۸	۱۳۹.۶	۴۲
۱۱۹.۵	۵۷.۳	۲۴.۹	۴۰.۴	۱۱۴.۶	۶.۵	۱۱۸.۳	۴۳
۹۶.۱	۹۴.۰	۳۰.۰	۴۹.۸	۸۸.۰	۵.۳	۱۱۵.۷	۴۴
۱۴۵.۷	۵۹.۸	۴۵.۳	۴۲.۱	۱۰۳.۹	۹.۶	۱۲۴.۳	۴۵
۱۴۵.۵	۳۴.۴	۲۳.۲	۷۷.۹	۱۱۷.۸	۶.۴	۱۰۶.۴	۴۶
۱۴۲.۳	۵۵.۵	۳۴.۲	۶۰.۰	۹۷.۶	۹.۳	۱۲۷.۷	۴۷
۱۱۵.۱	۵۴.۰	۳۹.۴	۵۱.۵	۱۲۲.۰	۵.۸	۱۲۵.۱	۴۸
۱۱۱.۴	۶۱.۰	۲۶.۸	۶۸.۵	۹۹.۷	۶.۳	۱۳۳.۶	۴۹
۱۲۸.۶	۵۰.۷	۳۰.۰	۶۰.۰	۱۱۴.۰	۷.۰	۱۲۵.۰	۵۰



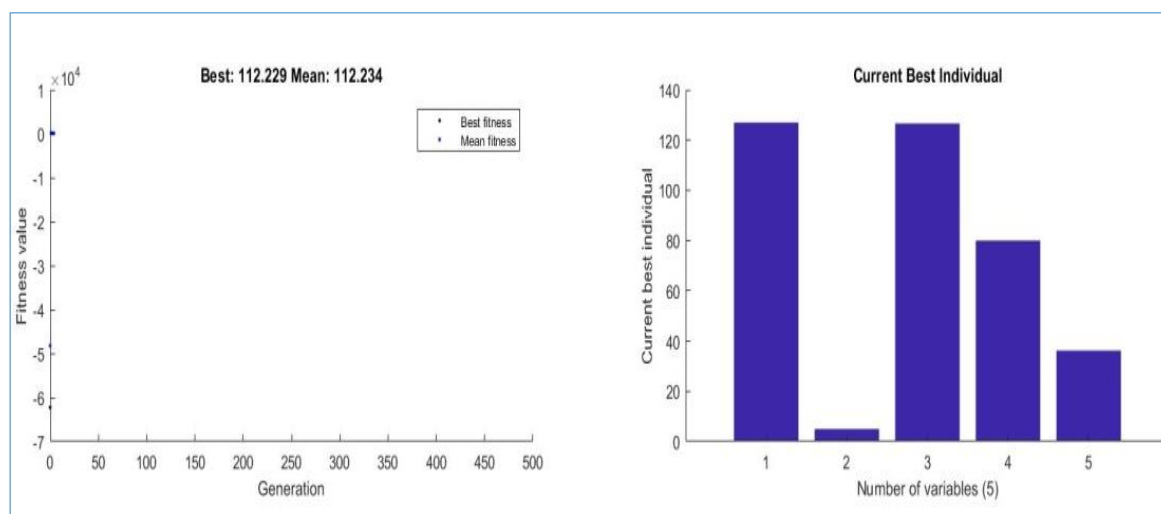
در ابتدا در جدول (۶) نتایج حاصل شده از حل اولیه پارامترها برای آموزش شبکه عصبی ارائه خواهند شد. انتخاب توزیع استفاده از این پارامترها طبق موارد بخش قبل بر اساس روش لاتین هایپرکیوب بوده است. شکل‌های (۶) و (۷) نمونه رگرسیون به دست آمده برای توابع شبکه عصبی برای توابع وزن و تغییر قطر در لوله کارگیت اسپیرال را نشان می‌دهند. این شکل‌ها شامل رگرسیون داده‌های آموزش یافته، داده‌های استفاده شده برای توسعه تابع شبکه عصبی و در آخر رگرسیون داده‌های جدا شده جهت انجام آزمون اعتبارسنجی هستند. پس از آن در شکل (۸) نتیجه بهینه سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک نرم‌افزار متلب، ارائه شده است.



شکل ۶: میزان رگرسیون به دست آمده برای تابع وزن در شبکه عصبی برای لوله کارگیت اسپیرال



شکل ۷: میزان رگرسیون به دست آمده برای تابع تغییر قطر در شبکه عصبی برای لوله کارگیت اسپیرال



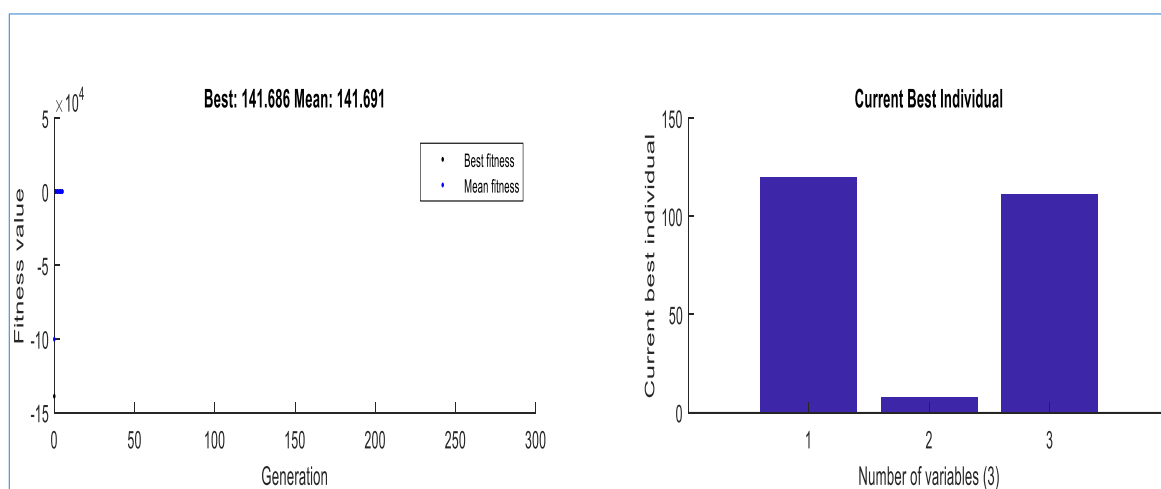
شکل ۸: خروجی الگوریتم ژنتیک متلب برای لوله کروگیت اسپیرال-پارامترهای بهینه در بالا راست و مقدار وزن بهینه در بالا چپ

همانطور که از خروجی نرم‌افزار متلب مشخص است میزان وزن بهینه تعیین شده برابر با ۱۱۲ کیلوگرم است که با شبیه سازی دقیق حالت بهینه حاصله این مقدار برابر با ۱۱۲ کیلوگرم به دست آمده که خطایی برابر با ۱/۷۵ درصد را بین نتایج شبکه عصبی و شرایط حقیقی نشان می‌دهد و نشان از مناسب بودن توابع اعمال شده شبکه عصبی و دقت آنها است.

نتایج برای لوله کارگیت

در ابتدا در ادامه نتایج حل‌های استفاده شده برای آموزش شبکه عصبی مرور شده و سپس نتایج بهینه سازی به دست آمده به صورت مختصر ارایه خواهند شد. جدول شماره (۷) نتایج حل‌های اولیه که برای آموزش شبکه عصبی در لوله کارگیت استفاده شده است را ارایه می‌دهد.

در شکل (۹) نمونه خروجی از حل الگوریتم بهینه‌سازی، برای لوله کارگیت ارایه شده است. پاسخ‌های پارامترهای بهینه، در سمت راست این شکل نشان داده شده است. با قرار دادن مقادیر بالا در یک کد، شبکه عصبی آموزش داده شده است تا با گرفتن مقادیر ورودی از هندسه معادل وزن و تغییر قطر را به عنوان خروجی ارایه دهد. سپس این شبکه عصبی به عنوان یک تابع هدف، به الگوریتم ژنتیک داده شده است. میزان تغییر قطر نهایتاً به عنوان یک قید تعریف شده است تا از میزان تعیین شده استاندارد فراتر نرود. کمینه وزن حاصله در شرایط بهینه سازی برابر با ۱۴۲ کیلوگرم به دست آمده است.



شکل ۹: نتیجه بهینه‌سازی برای پروفیل کارگیت (در بالا سمت چپ مقدار تابع هزینه یا همان وزن)



جدول ۷: نتایج حل‌های اولیه برای آموزش شبکه عصبی در لوله کارگیت

وزن (کیلوگرم)	تغییرات قطر (میلی‌متر)	عرض (میلی‌متر)	ضخامت (میلی‌متر)	طول (میلی‌متر)	شماره
۱۷۷/۹	۵۴	۹۰	۱۲	۱۴۰	۱
۱۵۸/۸	۹۳/۱	۷۰	۱۲	۱۴۰	۲
۱۳۵/۲	۱۰۶/۶	۷۰	۱۰	۱۴۰	۳
۱۸۷/۷	۴۲/۷۶	۱۰۰	۱۲	۱۴۰	۴
۱۷۳/۷	۴۶/۱۰	۱۰۰	۱۱	۱۴۰	۵
۱۶۹/۲	۵۱/۳۰	۹۵	۱۱	۱۴۰	۶
۱۸۱/۴	۴۹/۳۰	۹۰	۱۲	۱۳۰	۷
۱۸۶/۶	۴۳/۵۰	۹۵	۱۲	۱۳۰	۸
۱۷۳/۶	۴۶/۳۶	۹۵	۱۱	۱۳۰	۹
۱۸۲/۸	۴۷/۶۶	۹۵	۱۲	۱۴۰	۱۰
۱۸۰	۴۸/۵۶	۹۰	۱۲	۱۳۵	۱۱
۱۸۵	۴۳/۷۴	۹۵	۱۲	۱۳۵	۱۲
۱۶۴	۵۷/۳۰	۹۰	۱۱	۱۴۰	۱۳
۱۷۰	۴۸/۸۰	۹۵	۱۱	۱۳۷	۱۴
۱۷۱/۳	۴۶/۴۸	۹۵	۱۱	۱۳۵	۱۵
۱۶۹/۵	۴۸/۶۰	۹۳	۱۱	۱۳۵	۱۶
۱۶۶/۷	۵۲/۰۶	۹۰	۱۱	۱۳۵	۱۷
۱۵۸/۹	۵۵/۵۰	۹۰	۱۰	۱۲۰	۱۸
۱۸۶/۷	۴۸/۲۴	۹۰	۱۲	۱۲۰	۱۹
۲۰۰	۴۷/۲۰	۹۰	۱۲	۱۰۰	۲۰
۱۷۱/۲	۵۳/۷۶	۹۰	۱۱	۱۲۵	۲۱
۱۶۴/۳	۴۸/۳۷	۹۵	۱۰	۱۲۰	۲۲
۱۷۵	۴۴/۵۰	۱۰۰	۱۰	۱۱۰	۲۳
۱۶۵	۵۵/۵۶	۹۰	۱۰	۱۱۰	۲۴
۱۷۲/۱	۴۶/۷۱	۹۷	۱۰	۱۱۰	۲۵
۱۷۳/۳	۵۰/۱۶	۹۰	۱۱	۱۲۰	۲۶
۱۷۶/۸	۴۶/۸۰	۹۳	۱۱	۱۲۰	۲۷
۱۷۸/۸	۴۴/۷۵	۹۵	۱۱	۱۲۰	۲۸
۱۷۶/۹	۴۷/۴۵	۹۵	۱۰	۱۰۰	۲۹
۱۹۲/۴	۴۴/۲۰	۹۵	۱۱	۱۰۰	۳۰
۱۷۹/۱	۵۱/۹۵	۹۰	۱۰	۹۰	۳۱
۱۸۰/۹	۴۴/۳۹	۹۵	۱۰	۹۵	۳۲
۱۷۵	۴۹/۹۱	۹۰	۱۰	۹۵	۳۳
۱۹۰/۲	۴۶/۵۸	۹۰	۱۱	۹۵	۳۴
۱۴۴/۳	۷۲/۷۵	۸۰	۸	۸۰	۳۵
۱۹۰	۵۸/۳۰	۸۰	۱۱	۸۰	۳۶
۱۶۷	۴۸/۲۴	۹۵	۱۰	۱۱۵	۳۷
۱۶۹	۴۶/۱۶	۹۷	۱۰	۱۱۵	۳۸
۱۶۳	۴۹/۷	۹۷	۱۰	۱۲۵	۳۹
۱۶۶	۴۶/۳۱	۹۷	۱۰	۱۲۰	۴۰
۱۶۶/۳	۴۶/۷	۱۰۰	۱۰	۱۲۵	۴۱
۱۷۳	۴۵/۸۳	۹۵	۱۰	۱۰۵	۴۲
۱۵۷/۷	۴۹/۹۹	۹۵	۹	۱۰۵	۴۳
۱۶۸	۵۱/۴۶	۹۰	۱۰	۱۰۵	۴۴
۱۷۱/۴	۵۳/۳۵	۹۰	۱۰	۱۰۰	۴۵
۱۸۲/۵	۴۲/۵۲	۱۰۰	۱۰	۱۰۰	۴۶



نتیجه‌گیری

در این مقاله، بهینه‌سازی پروفیل لوله‌های کارگیت و اسپیرال کارگیت با قید میزان تغییر قطر مجاز در ازای وارد آمدن میزان نیرویی معین و با هدف کاهش وزن انجام شده است. روش بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک بوده و تابع هزینه استفاده شده در بهینه‌سازی، با استفاده از شبکه عصبی تولید شده است. برای آموزش شبکه عصبی، از حل‌هایی با روش المان محدود در نرم‌افزار مکانیکال انسیس استفاده شده است. برای انتخاب نمونه ورودی برای آموزش شبکه عصبی، در لوله‌های کارگیت از ترکیب مقادیری از پارامترها به انتخاب استفاده شده و در حالت لوله کارگیت اسپیرال به دلیل تعداد پارامتر بالاتر، از روش انتخاب آزمایش، با روش لاتین هایپرکیوب استفاده شده است. براساس نتایج به دست آمده از مدل‌سازی‌های مختلف، تیم تحقیق و توسعه شرکت نشاگستر پردیس و شرکت آکو آب کاسپین اقدام به طراحی و تولید لوله‌های کارگیت و کارگیت اسپیرال، با ابعاد پروفیل بهینه، جهت بهترین کارائی و استحکام نموده است.

تشکر و قدردانی

از شرکت پژوهش و فناوری پتروشیمی برای حمایت از این تحقیق، تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

- [1] Emsley, J., (2001). Polyethylene: Properties and applications. *Polymer Journal*, 33(2), pp 89–103.
- [2] International Organization for Standardization. (2016). *Plastics—Determination of the stiffness of rigid plastics—Flexural test (ISO 9969:2016)*. ISO.
- [3] Mosquera Morales, J. A., (2023). Characterization and evaluation of mechanical properties in double-wall PVC sewer pipes.
- [4] Kefci, Y., (2020). Determination of the optimum geofoam geometry for shallowly buried flexible pipe by finite element analyses (Master's thesis, Middle East Technical University).
- [5] Bilski, J., Kowalczyk, B., Marchlewska, A., Zurada, J. M., (2020). Local Levenberg-Marquardt algorithm for learning feedforward neural networks. *Journal of Artificial Intelligence and Soft Computing Research*, 10(4), pp 299-316.
- [6] Paji, M. K., Gordan, B., Bedon, C., Faridmehr, I., Valerievich, K., Hwang, H. J., (2023). Artificial Neural Network Levenberg-Marquardt Based Algorithm for Compressive Strength Estimation of Concrete Mixed with Magnetic Salty Water. *Engineered Science*, 23.
- [7] Mathkoor, M. S., Jassim, R. J., Al-Sabur, R., (2024). Application of Pattern Search and Genetic Algorithms to Optimize HDPE Pipe Joint Profiles and Strength in the Butt Fusion Welding Process. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 8(5), 187.
- [8] Rao, S. S., (2019). *Engineering optimization: theory and practice*. John Wiley & Sons.
- [9] Alwosheel, A., van Cranenburgh, S., Chorus, C. G., (2018). Is your dataset big enough? Sample size requirements when using artificial neural networks for discrete choice analysis. *Journal of choice modelling*, 28, pp 167-182.
- [10] Goodfellow, I., (2016). *Deep learning* (196). MIT press.
- [11] Marsili Libelli, S., Alba, P., (2000). Adaptive mutation in genetic algorithms. *Soft computing*, 4, pp 76-80.
- [12] Kaya, Y., Uyar, M., (2011). A novel crossover operator for genetic algorithms: ring crossover. *arXiv preprint arXiv:1105.0355*.