

تحلیل دینامیکی و پیش‌بینی رفتار شبکه‌های انتقال گاز با مدل شبکه عصبی NARX برای مدیریت نوسانات تقاضا

امیرحسین شیری^۱، محمد فخرالاسلام^{۲*}

۱- کارشناسی ارشد رشته مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران- amirhshiri8678@gmail.com

۲- استادیار رشته مهندسی شیمی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران- fakhroleslam@modares.ac.ir

در این پژوهش، یک مدل جایگزین مبتنی بر شبکه عصبی NARX برای شبیه‌سازی دینامیکی شبکه‌های انتقال گاز توسعه داده شد. داده‌های شبه‌تجربی مدل جایگزین از شبیه‌سازی دینامیکی یک واحد شبه‌واقعی در محیط Aspen HYSYS استخراج و سپس در قالب بلوک‌های ماژولار در محیط Simulink پیاده‌سازی گردید. مدل پیشنهادی قادر است متغیرهای کلیدی شامل فشار، دبی، موجودی گاز و توان مصرفی تجهیزات را با دقت بالا و در زمان محاسباتی بسیار کوتاه پیش‌بینی کند. برای اعتبارسنجی، یک شبکه انتقال گاز با سه خط لوله اصلی به‌عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شد و نتایج نشان داد که مدل توسعه‌یافته توانایی شبیه‌سازی سریع رفتار سیستم در شرایط گذرا، مدیریت نوسانات تقاضا و پیش‌بینی بار تجهیزاتی نظیر کمپرسور و کولر را دارد. این مدل می‌تواند به‌عنوان ابزاری کارآمد برای بهره‌برداران و تصمیم‌گیران در صنعت گاز به‌ویژه در سناریوهای حساس مانند اوج مصرف و مدیریت نوسانات شبکه به کار رود و زمینه‌ساز افزایش کارایی و کاهش هزینه‌های عملیاتی باشد.

کلمات کلیدی: شبیه‌سازی دینامیکی، مدل جایگزین، NARX، موجودی خط لوله، یادگیری ماشین

۱. مقدمه

گاز طبیعی به عنوان یکی از منابع اصلی انرژی تجدیدناپذیر، نقش برجسته‌ای در تأمین انرژی جهانی ایفا می‌کند [۱]. مزایای این منبع انرژی شامل کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و هزینه‌های سرمایه‌گذاری پایین‌تر در مقایسه با سوخت‌های فسیلی دیگر، موجب افزایش استفاده از آن در تولید برق و صنایع مختلف شده است. پیش‌بینی‌ها نشان می‌دهند که گاز طبیعی تا سال ۲۰۵۰ همچنان نقش کلیدی در تأمین نیازهای انرژی جهان خواهد داشت [۲]. از طرفی، بررسی‌های متعدد نشان می‌دهند که مصرف، تولید و ذخایر گاز طبیعی در سطح جهانی و همچنین در ایران به طور پیوسته در حال افزایش است [۳]. این رشد تقاضا نیازمند روش‌های بهینه‌سازی پیچیده‌تری برای مدیریت تامین و انتقال گاز طبیعی در سطح ملی و بین‌المللی خواهد بود.

با این حال انتقال و ذخیره‌سازی گاز طبیعی به دلیل ویژگی‌های فیزیکی آن همچنان چالش‌برانگیز است. برخلاف نفت که به راحتی در مخازن بزرگ و تانکرهای ارزان قیمت ذخیره و حمل می‌شود، گاز نیاز به فشار بالا یا دمای پایین برای انتقال دارد. در این زمینه، خطوط لوله به عنوان قدیمی‌ترین و رایج‌ترین روش انتقال گاز طبیعی، با وجود پیچیدگی و هزینه‌بر بودن ساخت آن‌ها، هنوز هم از کارآمدترین گزینه‌ها هستند. این شبکه‌ها با بهره‌گیری از فناوری‌های نوین در کنترل فشار و بهینه‌سازی جریان، قادر به انتقال حجم بالایی از گاز از منابع تولید به مراکز مصرف هستند. اهمیت چنین شبکه‌هایی در تضمین امنیت انرژی و پاسخ‌گویی به نوسانات تقاضا، به‌ویژه در مقیاس کلان، بسیار حائز اهمیت است [۴]. این شبکه‌ها از

اجزای کلیدی مانند خطوط لوله، ایستگاه‌های تقویت فشار و شیرآلات کنترلی تشکیل شده‌اند که هر یک نقش مؤثری در عملکرد بهینه سیستم دارند [۵].

تاریخچه فناوری انتقال گاز به قرن نوزدهم برمی‌گردد که به‌طور اولیه برای توزیع محلی طراحی شد و با رشد شهرنشینی و تقاضای انرژی، به شبکه‌های پیچیده و گسترده تبدیل گردید. پیشرفت در فناوری‌های حفاری و فشرده‌سازی، امکان انتقال گاز در فواصل طولانی را فراهم ساخت و زمینه‌ساز توسعه شهری و تأمین انرژی در سطح ملی و بین‌المللی شد [۶]. از دهه ۱۹۷۰، مدل‌های ریاضی برای تحلیل و بهینه‌سازی سیستم‌های انتقال گاز به کار گرفته شد. ویل و همکاران در ۱۹۷۱ با استفاده از روش تفاضل محدود ضمنی، شبیه‌سازی گذرا در خطوط لوله را با دقت بالاتری انجام دادند [۷]. محیط‌پور و همکاران در ۱۹۹۶ نشان دادند که نرخ جریان جرمی در طول زمان ثابت نیست و نیاز به مدل‌های گذرا دارند [۸].

مطالعات اخیر نشان داده‌اند که مدل‌سازی گذرای شبکه‌های گاز نقشی کلیدی در مدیریت شرایط بحرانی و پیک‌مصرف دارد. پامبور و همکاران (۲۰۱۶) یک مدل هیدرولیکی گذرای یکپارچه معرفی کردند که اجزای کلیدی مانند خطوط لوله، ایستگاه‌های فشار، ترمینال‌های LNG و ذخیره‌سازی زیرزمینی را شبیه‌سازی کرده و امکان تحلیل واکنش شبکه به اختلالات عملیاتی را فراهم می‌کند [۵]. سوندرا و زلوتنیک (۲۰۱۹) با استفاده از داده‌های واقعی و معادلات دیفرانسیلی-جزئی، روشی برای تخمین همزمان حالت و پارامترهای شبکه ارائه دادند که دقت پیش‌بینی رفتار گذرا را بهبود می‌بخشد [۹]. دامشکه و همکاران (۲۰۲۲) نیز یک چارچوب بهینه‌سازی پیوسته برای شبیه‌سازی گذرا ارائه کردند که علاوه بر کاهش زمان محاسبات، قابلیت استفاده در مدیریت بلادرنگ را دارد [۱۰]. از سوی دیگر، مطالعات شوالیه و وو (۲۰۲۰) [۱۱] و سو و همکاران (۲۰۲۱) [۱۲] بر نقش موجودی خط (Linepack) در مدیریت نوسانات تقاضا و امنیت تأمین تأکید داشته‌اند. این پژوهش‌ها نشان می‌دهند که در شرایط بحرانی، ذخیره‌سازی خطی می‌تواند نقش بااهمیتی در پایداری شبکه ایفا کند. علاوه بر این، شو و همکاران (۲۰۲۲) با ارائه یک روش حل نیمه‌تحلیلی، زمان شبیه‌سازی را به‌طور چشمگیری کاهش دادند [۱۳]. وانگ و همکاران (۲۰۲۳) مدل معادل دینامیکی ذخیره‌سازی انرژی در خطوط لوله را برای بهینه‌سازی هم‌زمان شبکه‌های گاز و برق پیشنهاد کردند [۱۴]. همچنین، مارتینی و همکاران (۲۰۲۵) سامانه‌ای چندمقیاسی برای شبیه‌سازی گذرای سریع توسعه دادند که عملکرد آن در سناریوهای اضطراری به‌طور موفقیت‌آمیز ارزیابی شد [۱۵].

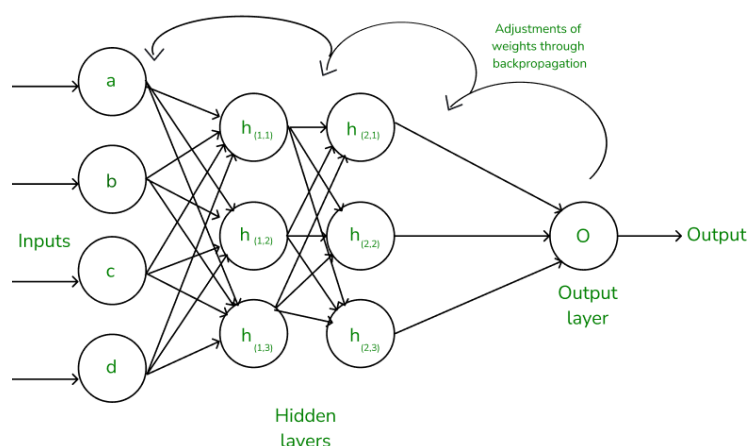
در این راستا، مدل‌های مختلف ریاضیاتی برای شبیه‌سازی و تحلیل سیستم‌های انتقال گاز توسعه یافته‌اند که برخی به‌طور ویژه برای پیش‌بینی رفتار جریان در شرایط گذرا به کار می‌روند [۱۶]. تقاضای گاز در شرایط بحرانی، به‌خصوص در زمان‌های اوج مصرف، اهمیت بیشتری می‌یابد. مطالعات نشان داده‌اند که ظرفیت ذخیره‌سازی گاز در خطوط لوله می‌تواند به شکل معناداری بر عملکرد شبکه در شرایط گذرا اثر بگذارد، به‌ویژه زمانی که جریان با تغییرات سریع یا اختلال مواجه می‌شود [۱۷]. مدل‌های جدید که موجودی خط را به‌عنوان یک پارامتر کلیدی در نظر می‌گیرند، نشان داده‌اند که این ظرفیت می‌تواند در مدیریت نوسانات تقاضا و تأمین پایدار گاز در مواقعی که منابع خارجی محدود هستند، نقش حیاتی ایفا کند [۱۸].

با وجود این پیشرفت‌ها، مدل‌سازی دینامیکی شبکه‌های انتقال گاز همچنان با چالش‌هایی نظیر پیچیدگی روابط حاکم، هزینه بالای شبیه‌سازی و نیاز به دقت بالا روبه‌روست. این عوامل، استفاده از مدل‌های جایگزین داده‌محور را به راهکاری جذاب برای شبیه‌سازی سریع و دقیق تبدیل کرده‌اند. در این پژوهش، با استفاده از شبکه عصبی بازگشتی با ورودی خارجی^۱ (NARX) و داده‌های شبیه‌سازی دینامیکی واحد شبه‌واقعی در نرم‌افزار Aspen HYSYS، مدلی جایگزین توسعه داده شده است که می‌تواند رفتار گذرای شبکه را با دقت بالا و زمان محاسبه بسیار کمتر پیش‌بینی کند. این مدل در سناریوهای عملیاتی پیچیده مانند اوج مصرف، توانایی بازتولید دقیق متغیرهایی نظیر فشار، دبی و موجودی خط را دارد و ابزاری کارآمد برای مدیریت شرایط بحرانی محسوب می‌شود.

^۱ Nonlinear autoregressive neural network with exogenous input

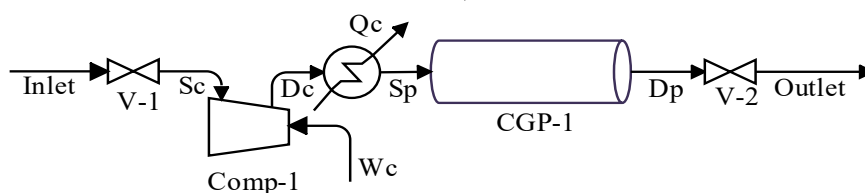
۲. ایجاد مدل جایگزین NARX برای واحد یکپارچه انتقال گاز طبیعی

برای مدل‌های جایگزین که نیاز به پیش‌بینی دقیق و قابلیت تعمیم بالایی دارند، شبکه‌های عصبی بازگشتی NARX به دلیل توانایی در شبیه‌سازی روابط غیرخطی پیچیده و یادگیری از داده‌های زمانی، به عنوان یک انتخاب مناسب شناخته می‌شوند. فرایند ایجاد مدل شبکه عصبی مصنوعی شامل سه مرحله اصلی است: آموزش، اعتبارسنجی و پیش‌بینی. در این فرآیند، شبکه عصبی با تنظیم وزن‌ها و بایاس‌ها به یادگیری و بهبود عملکرد خود می‌پردازد تا بهترین تطابق با داده‌های هدف داشته باشد. شکل ۱ نشان‌دهنده خروجی‌های صحیح برای یک مجموعه ورودی معین است.



شکل ۱- ساختار آموزش شبکه عصبی [۱۹].

برای آموزش مدل، ابتدا شبیه‌سازی حالت پایا مطابق شکل ۲ در نرم‌افزار Aspen HYSYS انجام شد تا داده‌های اولیه برای ایجاد مدل‌های دینامیکی جمع‌آوری شوند. سپس، شبیه‌سازی‌های دینامیکی با تغییر شرایط مرزی و پارامترهای عملیاتی مختلف (جدول ۱) برای تولید داده‌های آموزش و آزمون انجام گرفت.



شکل ۲- شماتیک شبیه‌سازی واحد شبه‌واقعی انتقال گاز طبیعی.

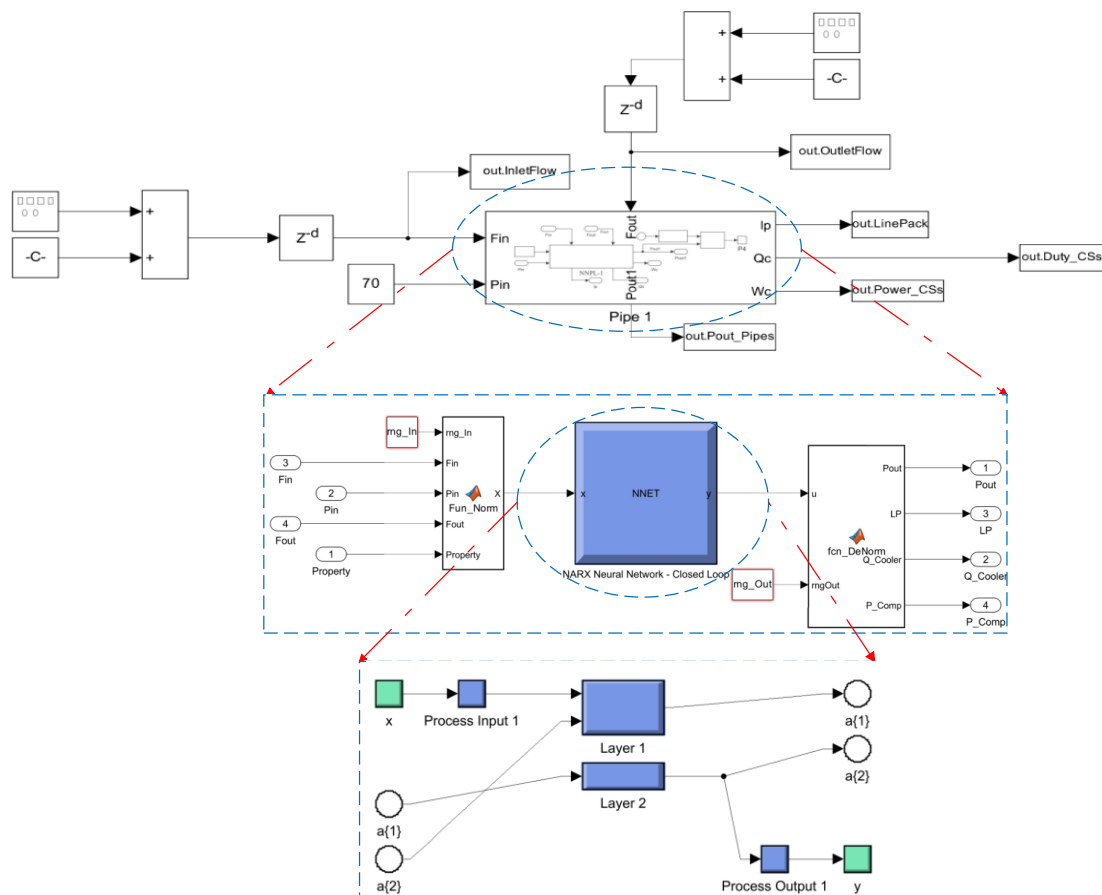
جدول ۱- ورودی‌های مدل جایگزین برای شبکه انتقال گاز طبیعی و بازه آن‌ها

پارامتر	نماد پارامتر	بازه مقدار	واحد
طول	L	۸۰-۱۲۰	km
زبری لوله	Ω	۲۵-۸۰	μ -inch
زاویه با افق	ε	-۳-۳	°
دبی ورودی	F_{in}	۸۰-۱۲۰	MMSCMD
دبی خروجی	F_{out}	۸۰-۱۲۰	MMSCMD

مدل NARX با استفاده از بیش از ۱۰,۰۰۰ سری داده زمانی از این شبیه‌سازی‌ها توسعه یافت و پنج متغیر کلیدی شامل فشار، دبی خروجی، موجودی گاز، توان مصرفی کمپرسور و کولر هوایی را پیش‌بینی می‌کند. داده‌ها به سه دسته آموزشی، اعتبارسنجی و تست تقسیم شده و آموزش مدل ابتدا به صورت باز و سپس به فرم بسته انجام شد. مدل با استفاده از الگوریتم پس‌انتشار لوبنبرگ مارکوارت^۱ آموزش داده شد و از خطای میانگین مربعات^۲ (MSE) برای ارزیابی عملکرد مدل استفاده شد.

۱.۲. پیاده سازی بلوک مدل جایگزین در محیط Simulink

در این بخش، پس از تأیید دقت مدل، شبکه عصبی آموزش‌دیده به محیط Simulink منتقل شده و به صورت بلوک دینامیکی برای شبیه‌سازی خطوط لوله گاز پیاده‌سازی شد. این بلوک به گونه‌ای طراحی گردید که پارامترهای عملیاتی مانند دبی ورودی و خروجی، فشار ورودی و خواص سیال به عنوان ورودی‌های قابل تعریف دریافت شوند و پس از نرمال‌سازی، به شبکه عصبی NARX ارسال گردند. خروجی‌های مدل شامل فشار خروجی، ذخیره‌سازی خط، توان مصرفی کمپرسور و انرژی مصرفی کولر هوایی بوده و پس از برگرداندن مقیاس، مستقیماً در اختیار سایر اجزای شبیه‌سازی قرار می‌گیرد.



شکل ۳- پیاده‌سازی مدل شبکه عصبی NARX در محیط Simulink به عنوان بلوک دینامیکی واحد یکپارچه انتقال گاز.

^۱ Levenberg-Marquardt back Propagation

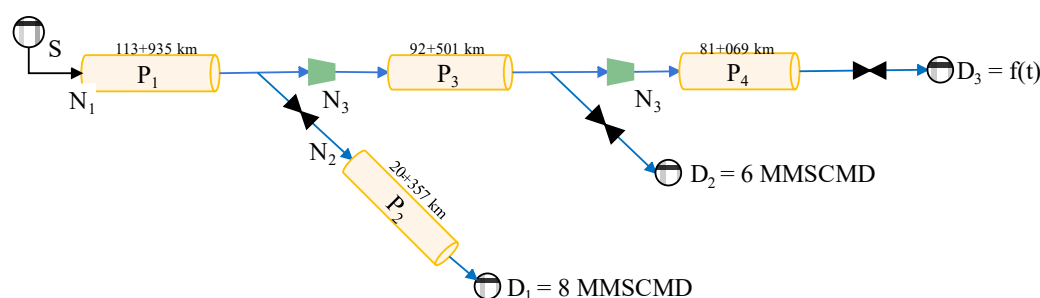
^۲ Mean Squared Error

برای افزایش انعطاف‌پذیری، هر خط لوله به‌صورت یک زیرسیستم مستقل با سه بخش اصلی طراحی شد: ماژول پردازش داده، بلوک شبکه عصبی و بخش بازمقیاس‌گذاری. این ساختار امکان اتصال خطوط لوله به‌صورت سری یا موازی را فراهم کرده و توسعه مدل برای شبکه‌های گسترده انتقال گاز را ممکن می‌سازد. شکل ۳ روند پیاده‌سازی، از نمای کلی بلوک تا جزئیات داخلی شبکه عصبی را نشان می‌دهد.

مدل شبکه عصبی NARX در محیط Simulink ابزاری کارآمد برای تحلیل و بهینه‌سازی عملکرد سامانه‌های انتقال گاز است. انعطاف‌پذیری این مدل در تعریف ورودی‌ها و سناریوهای عملیاتی مختلف، به‌علاوه قابلیت توسعه به مقیاس‌های بزرگ، آن را به ابزاری مؤثر برای ارزیابی استراتژی‌های بهره‌برداری و پیش‌بینی پاسخ سیستم در شرایط بحرانی تبدیل کرده است.

۲.۲. مطالعه موردی و تحلیل حساسیت نسبت به تقاضای گاز مصرفی

در مطالعه‌ی موردی این پژوهش، رفتار دینامیکی یک شبکه انتقال گاز با شاخه‌های اصلی و فرعی بررسی شد (شکل ۴). این شبکه از یک منبع تأمین گاز شروع شده و پس از عبور از مقاطع مختلف خط لوله و ایستگاه‌های تقویت فشار، گاز را به سه نقطه مصرف منتقل می‌کند. این ساختار شبکه امکان بررسی تغییرات بار مصرفی ثابت و متغیر را فراهم می‌کند.



شکل ۴- طرح کلی سیستم پیچیده شبکه‌های خط لوله گاز طبیعی.

در شبیه‌سازی‌ها، فشار عملیاتی ورودی ۹ مگاپاسکال و دمای متوسط گاز ۳۱۳ کلوین در نظر گرفته شد. ایستگاه‌های تقویت فشار نیز در محل گره‌های اصلی جانمایی شدند تا پایداری فشار و انتقال پایدار گاز حفظ شود. مشخصات و داده‌های عملیاتی این ایستگاه‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- اطلاعات ایستگاه‌های تقویت فشار شبکه انتقال گاز مورد مطالعه.

ایستگاه ۴	ایستگاه ۳	ایستگاه ۲	ایستگاه ۱	واحد	-
۲۷۷/۵۰۵	۱۹۶/۴۳۶	۱۱۳/۹۳۵	۰	km	کیلومتر
۳۶	۱۳	۱۱۰	۳۲	m	ارتفاع
۹۰	۹۰	۹۰	۹۰	bar	فشار خروجی
۴۰	۴۰	۴۰	۴۰	°C	دمای خروجی
۹	۱۱	۱۱	۱۰	°C	دمای محیط
۱۱۰۰	۱۱۰۰	۱۱۰۰	۱۱۰۰	μ-inch	زبری خط
۳+۱	۳+۱	۳+۱	۳+۱	-	چیدمان ایستگاه

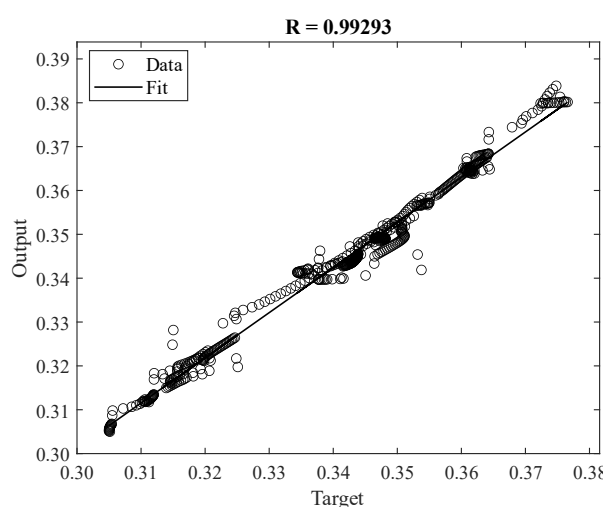
در نهایت کل شبکه به صورت یکپارچه در محیط MATLAB/Simulink مدل سازی شده و هر مقطع خط لوله به عنوان یک بلوک مدل NARX مستقل پیاده سازی گردید. جریان ورودی هر گره مصرف، بر اساس پروفیل های زمانی سناریوی مورد بررسی تعریف شد و اثر آن بر پارامترهای کلیدی شبکه تحلیل گردید. این ساختار ماژولار، امکان ارزیابی دقیق رفتار گذرا و پاسخ هیدرولیکی شبکه در برابر نوسانات تقاضا را فراهم می کند.

۳. نتایج و بحث

در این بخش، نتایج اعتبارسنجی مدل جایگزین بررسی می شود. فرآیند اعتبارسنجی در دو مرحله انجام شد: در ابتدا دقت پیش بینی و کارایی مدل ارزیابی گردید و سپس عملکرد مدل در شرایط عملیاتی مختلف با شبیه سازی یک شبکه انتقال گاز طبیعی واقعی سنجیده شد. در این شبیه سازی، تغییرات دبی ورودی و خروجی و تغییرات ناگهانی جریان در شرایط نزدیک به حدود عملیاتی بررسی شد. تأثیر این تغییرات بر رفتار هیدرولیکی، موجودی گاز و عملکرد واحد تراکم تحلیل گردید. همچنین، پایداری فشار، ظرفیت ذخیره سازی خط و زمان پاسخ تجهیزات ارزیابی شد. این تحلیل ها به شناسایی پارامترهای کلیدی عملکرد، بهینه سازی پارامترهای عملیاتی و بهبود بهره وری انرژی کمک کرد. شبیه سازی ها بر روی رایانه ای با فرکانس ۲/۴۰ گیگاهرتز، حافظه کش ۴ مگابایت و ۱۶ گیگابایت RAM اجرا شد.

۱.۳. عملکرد مدل جایگزین شبکه انتقال گاز طبیعی

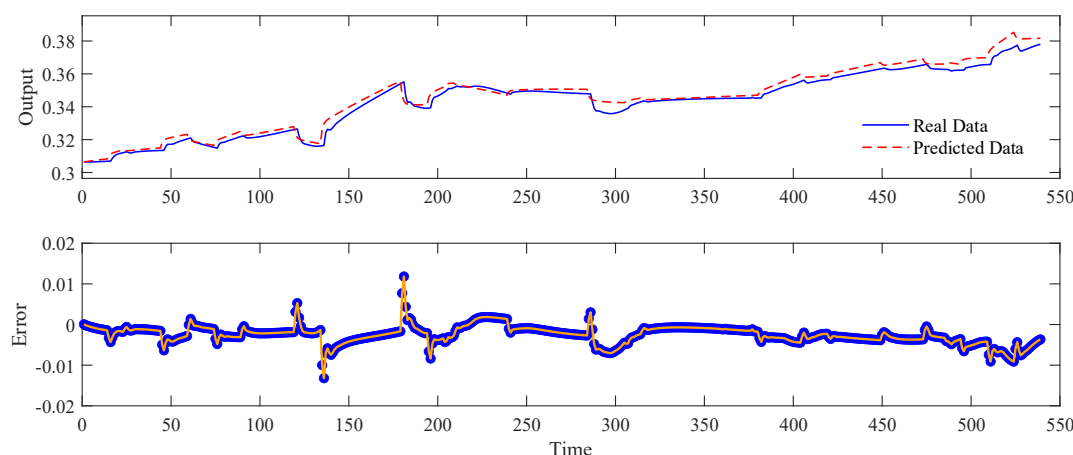
در فرآیند آموزش، مدل NARX به MSE برابر با ۰.۰۰۶۶ رسید که نشان دهنده دقت بالای مدل در پیش بینی خروجی ها است. این مقدار کم خطا، تطابق نزدیک پیش بینی ها با داده های واقعی را تأیید می کند. اعتبارسنجی مدل در مراحل آموزش و تست نیز این دقت را تأیید کرده و نشان می دهد که مدل قابلیت تعمیم پذیری خوبی به داده های جدید دارد. شکل ۵ تطابق پیش بینی های مدل با داده های واقعی موجودی گاز و شکل ۶ مقایسه موجودی گاز مدل شبه واقعی با خروجی های تخمینی مدل جایگزین را نشان می دهد.



شکل ۵- نمودار رگرسیون تخمین موجودی گاز شبکه عصبی آموزش دیده واحد شبه واقعی انتقال گاز.

مدل جایگزین توانسته است پیش بینی های دقیقی از تغییرات دینامیکی متغیرهای سیستم ارائه دهد. همان طور که در شکل ۶ مشاهده می شود، تطابق نتایج پیش بینی شده با داده های مرجع نشان دهنده دقت بالای مدل در تقلید و پیش بینی

رفتار سیستم است. باین حال، در برخی نقاط که تغییرات ناگهانی در ورودی‌ها رخ داده، اختلافات جزئی مشاهده می‌شود که می‌تواند به ماهیت غیرخطی سیستم و چالش‌های یادگیری تغییرات شدید مرتبط باشد. به‌طور کلی، این شبکه توانسته است روند کلی متغیرها را به‌درستی مدل‌سازی کرده و نشان دهد که از قابلیت تعمیم‌پذیری مناسبی برخوردار است.



شکل ۶- مقایسه داده های خروجی موجودی گاز خط لوله واحد شبه واقعی با پیش‌بینی مدل NARX.

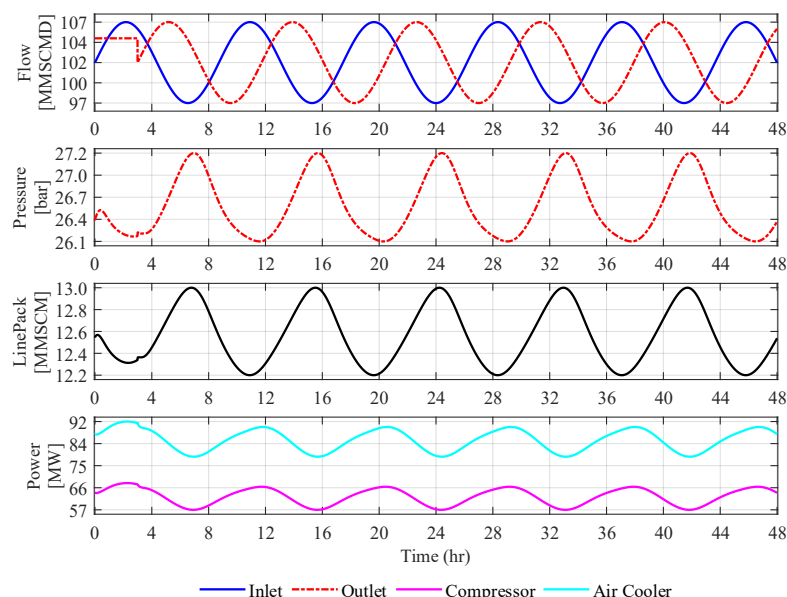
۲.۳. آنالیز حساسیت شبکه انتقال گاز مورد مطالعه

در این پژوهش، شبکه انتقال گاز مورد مطالعه در شکل ۴ به‌صورت یکپارچه در محیط Simulink مدل‌سازی شده است. هدف از تحلیل حساسیت، ارزیابی تأثیر تغییر در متغیرهایی نظیر فشار ورودی، دبی و سایر پارامترهای دینامیکی و پایا بر رفتار سیستم است. نتایج این تحلیل می‌تواند اپراتورها را در پیش‌بینی عملکرد سیستم تحت سناریوهای مختلف یاری داده و فرآیند تصمیم‌گیری را بهینه‌سازی کند.

۳.۳. تحلیل حساسیت نسبت به دبی خروجی از شبکه انتقال گاز

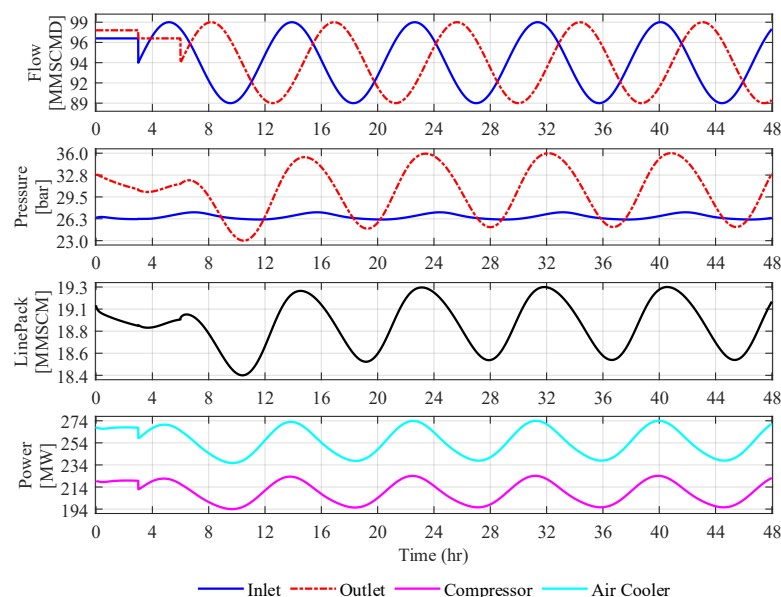
در این بخش، تحلیل حساسیت شبکه انتقال گاز بر اساس تغییرات دبی ورودی و فشار و خروجی و برای سه خط لوله اصلی در شکل‌های ۷ تا ۹ بررسی شده است. این تحلیل‌ها به‌طور کامل تأثیرات نوسانات دبی و فشار بر عملکرد سیستم را نشان می‌دهند و اپراتورها می‌توانند از آن برای بهینه‌سازی فرآیند تصمیم‌گیری استفاده کنند. در شکل‌های ارائه‌شده، دبی ورودی و خروجی، فشارهای ورودی و خروجی، موجودی گاز و قدرت مصرفی در طول زمان به نمایش درآمده‌اند. این داده‌ها نشان‌دهنده نوسانات پیچیده‌ای هستند که در شبکه به‌وجود می‌آیند و نحوه تأثیر آن‌ها بر عملکرد سیستم را در سه خط لوله مختلف تحلیل می‌کنند.

در شکل ۷، نتایج شبیه‌سازی خط لوله اول در شرایطی که فشار ورودی به‌طور ثابت روی ۶۰ بار نگه داشته شده است، ارائه شده است. در این حالت، دبی ورودی و خروجی به‌عنوان متغیرهای اصلی ورودی مدل جایگزین در نظر گرفته شده و نوسانات آن‌ها در بازه ۹۷ تا ۱۰۳ میلیون مترمکعب در روز، مبنای تحلیل رفتار دینامیکی سیستم قرار گرفته است. از آنجا که فشار ورودی ثابت است، می‌توان با دقت بیشتری به بررسی متغیرهای خروجی شامل فشار خروجی، موجودی خط و توان مصرفی تجهیزات پرداخت.



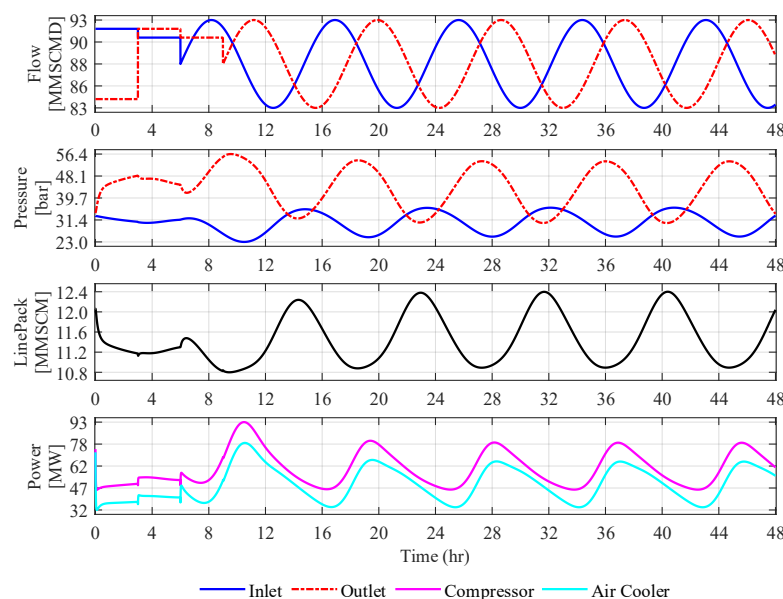
شکل ۷- نمایش تغییرات دبی، فشار، موجودی گاز و توان مصرفی کمپرسور و کولر برای اولین خط لوله.

نمودار فشار خروجی نشان می‌دهد که این متغیر به‌طور مستقیم تحت تأثیر اختلاف بین دبی ورودی و خروجی قرار دارد. در بازه‌هایی که دبی خروجی بیشتر از ورودی است، موجودی گاز کاهش یافته و افت فشار خروجی مشاهده می‌شود، در حالی که در شرایط عکس، موجودی گاز بازیابی شده و فشار خروجی به سمت مقادیر بالاتر حرکت می‌کند. این رفتار نشان می‌دهد که موجودی گاز نقش یک بافر طبیعی را ایفا کرده و امکان جبران نوسانات کوتاه‌مدت بین ورودی و خروجی را فراهم می‌کند. در شکل ۸، مشابه وضعیت شکل ۷، دبی ورودی و خروجی نوسانات قابل توجهی دارند، اما در اینجا فشار ورودی نیز متغیر است. تغییرات فشار ورودی به‌عنوان عامل جدید در این تحلیل تأثیر خود را در دبی خروجی و موجودی خط لوله می‌گذارد. در این حالت، علاوه بر تغییرات دبی، تأثیر فشار ورودی بر روی عملکرد سیستم از جمله کاهش دبی خروجی و تأثیر آن بر فشار شبکه دیده می‌شود. در اینجا، به علت تغییر فشار ورودی، نوسانات بیشتری در سیستم ایجاد می‌شود.



شکل ۸- نمایش تغییرات دبی، فشار، موجودی گاز و توان مصرفی کمپرسور و کولر برای دومین خط لوله.

در شکل ۹، تغییرات فشار ورودی و دبی به‌طور مشابه در طول زمان نوسان دارند، اما با تأثیرات بیشتری از انشعابات شبکه و کاهش دبی ورودی به‌ویژه در نقاط خاص شبکه مواجه‌ایم. در این شکل، دبی ورودی کاهش می‌یابد که به دلیل تغییرات تقاضا و نیاز به تنظیم فشار در سیستم است. در این شرایط، فشار ورودی و دبی خروجی تحت تأثیر یکدیگر قرار گرفته و نوسانات بیشتری در فشار و موجودی خط لوله ایجاد می‌شود.



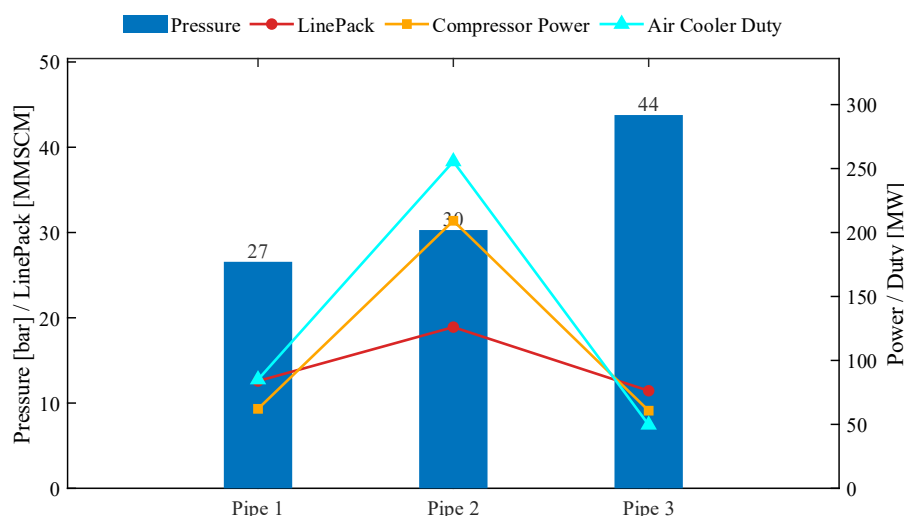
شکل ۹- نمایش تغییرات دبی، فشار، موجودی گاز و توان مصرفی کمپرسور و کولر برای آخرین خط لوله.

نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهند که نوسانات دبی ورودی و خروجی تأثیر زیادی بر فشار خروجی و موجودی گاز دارند. کاهش یا افزایش دبی ورودی موجب تغییرات قابل توجه در فشار خروجی و ذخیره‌سازی گاز می‌شود، که نشان‌دهنده اهمیت بالای موجودی گاز در عملکرد سیستم است. همچنین، همبستگی قوی بین تغییرات فشار و دبی با توان مصرفی تجهیزات کمپرسور و کولر هوایی وجود دارد. به‌طور خاص، افزایش دبی ورودی و فشار خروجی منجر به افزایش توان مصرفی تجهیزات و کاهش دبی و فشار باعث کاهش توان مصرفی می‌شود. این تحلیل‌ها اهمیت استفاده از مدل‌های جایگزین و شبیه‌سازی‌های دقیق برای بهینه‌سازی بهره‌برداری و پیش‌بینی رفتار سیستم تحت شرایط مختلف را تأکید می‌کند.

در نهایت، برای جمع‌بندی نتایج تحلیل‌ها و مقایسه عملکرد سه خط لوله، شکل ۱۰ مقادیر میانگین فشار، موجودی گاز و توان مصرفی کمپرسور و کولر را برای هر یک از خطوط نشان می‌دهد. این نمودار ارتباط مستقیم تغییرات فشار و موجودی گاز با مصرف انرژی تجهیزات در طول زمان را نمایش می‌دهد و می‌تواند به اپراتورها کمک کند تا عملکرد سیستم را بهینه‌سازی کرده و تصمیمات مؤثری برای مدیریت شبکه اتخاذ کنند. همان‌طور که مشخص است، فشار ورودی خط لوله اول ثابت و بالا بوده و این امر باعث کاهش انرژی مصرفی واحد تراکم می‌شود. البته، طول بیشتر این خط باعث افزایش افت فشار در طول مسیر می‌شود. در نهایت، این ویژگی‌ها به واحد تراکم امکان می‌دهد تا به‌طور بهینه انرژی مصرف کند.

در ادامه، افت فشار در خط لوله دوم نسبت به خط لوله اول کمتر بوده و در نهایت مقدار گاز بیشتری در ذخیره‌سازی خط لوله حفظ می‌شود، علی‌رغم طول کمتر این خط. این ویژگی نشان‌دهنده عملکرد بهینه ذخیره‌سازی در این خط لوله است که می‌تواند به‌طور مؤثری نوسانات دبی ورودی و خروجی را جبران کند. از طرفی، باید به این نکته توجه شود که قبل از خط لوله دوم، اولین انشعاب شبکه به مقدار ۸ میلیون مترمکعب در روز از روی مقدار ذخیره‌سازی تأثیر گذاشته است. این انشعاب باعث کاهش دبی ورودی و افزایش افت فشار در لوله دوم می‌شود.

در نهایت، در خط لوله آخر، طول نسبت به دو لوله قبلی کمتر است و از طرفی مقدار دبی ورودی نیز به علت انشعاب دوم شبکه، کمتر شده است؛ این دو موضوع در کنار یکدیگر افت فشار کمتر در این بخش را توجیه می‌کند. با این حال، کاهش دبی ورودی باعث می‌شود واحد تراکم در این خط لوله به انرژی کمتری نسبت به حتی خط لوله اول برای حفظ فشار موردنظر نیاز داشته باشد. این ویژگی نشان‌دهنده عملکرد کارآمدتر واحد تراکم در شرایطی است که طول خط لوله کمتر است و فشار ورودی نیز در سطح معقولی قرار دارد.



شکل ۱۰- مقایسه مقادیر میانگین فشار، موجودی گاز، توان مصرفی کمپرسور و کولر هوایی برای شبکه انتقال گاز مورد مطالعه.

۴. نتیجه‌گیری

شبکه‌های انتقال گاز به دلیل پیچیدگی‌های عملیاتی و نوسانات تقاضا نیازمند شبیه‌سازی دقیق رفتار دینامیکی هستند. شبیه‌سازی‌های معمولاً زمان‌بر و پرهزینه‌اند و در شبیه‌سازی شرایط گذرا و نوسانات تقاضا دقت کافی ندارند. در این پژوهش، مدل جایگزین مبتنی بر شبکه عصبی NARX برای شبیه‌سازی سریع و دقیق رفتار شبکه‌های گاز توسعه داده شد. این مدل با استفاده از داده‌های شبه‌واقعی و پیاده‌سازی آن در Simulink، توانسته است زمان محاسباتی را کاهش داده و دقت پیش‌بینی متغیرهای کلیدی مانند فشار، دبی، موجودی گاز و توان مصرفی تجهیزات را بهبود بخشد. مدل پیشنهادی در پیش‌بینی رفتار شبکه در شرایط گذرا و پیک مصرف به عنوان ابزاری مؤثر برای بهینه‌سازی شبکه‌های گاز عمل کرده است.

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهند که این مدل توانسته نوسانات دبی، فشار و موجودی گاز را به دقت پیش‌بینی کرده و نقش مهم موجودی خط در مدیریت نوسانات تقاضا را شبیه‌سازی نماید. تحلیل حساسیت این مدل نشان داد که تغییرات فشار ورودی، دبی و انشعابات شبکه تأثیر زیادی بر عملکرد سیستم دارند. این مدل با دقت بالا و زمان محاسبات کم ابزاری مناسب برای مدیریت شرایط بحرانی و پیک مصرف شبکه‌های گاز است و می‌تواند به بهره‌برداران در بهینه‌سازی تصمیمات و کاهش هزینه‌های عملیاتی کمک کند.

مراجع

- [1] S. Mathur *et al.*, "Industrial decarbonization via natural gas: A critical and systematic review of developments, socio-technical systems and policy options," *Energy Res. Soc. Sci.*, vol. 90, p. 102638, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2022.102638>.
- [2] "Petroleum and natural gas are the most-used fuels in the United States through 2050," U.S. Energy Information Administration. [Online]. Available: <https://www.eia.gov/outlooks/aeo/>
- [3] S. Solaymani, "A review on energy and renewable energy policies in Iran," *Sustainability*, vol. 13, no. 13, p. 7328, 2021.
- [4] H. Su *et al.*, "A method for the multi-objective optimization of the operation of natural gas pipeline networks considering supply reliability and operation efficiency," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 131, p. 106584, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.106584>.
- [5] K. A. Pambour, R. Bolado-Lavin, and G. P. J. Dijkema, "An integrated transient model for simulating the operation of natural gas transport systems," *J. Nat. Gas Sci. Eng.*, vol. 28, pp. 672–690, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.11.036>.
- [6] A. Herrán-González, J. M. De La Cruz, B. De Andrés-Toro, and J. L. Risco-Martín, "Modeling and simulation of a gas distribution pipeline network," *Appl. Math. Model.*, vol. 33, no. 3, pp. 1584–1600, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2008.02.012>.
- [7] A. J. Wiid, J. D. le Roux, and I. K. Craig, "Modelling of methane-rich gas pipeline networks for simulation and control," *J. Process Control*, vol. 92, pp. 234–245, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2020.06.010>.
- [8] M. Mohitpour, W. Thompson, and B. Asante, "The Importance of Dynamic Simulation on the Design and Optimization of Pipeline Transmission Systems." pp. 1183–1188, Jun. 09, 1996. doi: 10.1115/IPC1996-1930.
- [9] K. Sundar and A. Zlotnik, "Dynamic State and Parameter Estimation for Natural Gas Networks using Real Pipeline System Data," in *2019 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*, 2019, pp. 106–111. doi: 10.1109/CCTA.2019.8920430.
- [10] P. Domschke, O. Kolb, and J. Lang, "Fast and reliable transient simulation and continuous optimization of large-scale gas networks," *Math. Methods Oper. Res.*, vol. 95, no. 3, pp. 475–501, 2022, doi: 10.1007/s00186-021-00765-7.
- [11] S. Chevalier and D. Wu, "Dynamic linepack depletion models for natural gas pipeline networks," *Appl. Math. Model.*, vol. 94, pp. 169–186, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2020.12.022>.
- [12] H. Su *et al.*, "Development of an integrated dynamic model for supply security and

- resilience analysis of natural gas pipeline network systems,” *Pet. Sci.*, vol. 19, no. 2, pp. 761–773, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.petsci.2021.10.002>.
- [13] X. Xu, R. Yao, K. Sun, and F. Qiu, *Simulation of Transients in Natural Gas Networks via A Semi-analytical Solution Approach*. 2022. doi: 10.48550/arXiv.2210.03298.
- [14] S. Wang, W. Wu, C. Lin, and B. Chen, “A Dynamic Equivalent Energy Storage Model of Natural Gas Networks for Joint Optimal Dispatch of Electricity-Gas Systems,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 15, no. 1, pp. 621–632, 2024, doi: 10.1109/TSTE.2023.3318349.
- [15] T. Martini, S. Ganter, J. Finger, and A. Stolz, “A robust transient gas network simulation for predicting the dynamics before, during, and after extensive disruptions,” *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 265, p. 111465, 2026, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2025.111465>.
- [16] A. S. M. Alghlam, V. D. Stevanovic, E. A. Elgazdori, and M. Banjac, “Numerical simulation of natural gas pipeline transients,” *J. Energy Resour. Technol.*, vol. 141, no. 10, p. 102002, 2019.
- [17] C. Hyett, L. Pagnier, J. Alisse, L. Sabban, I. Goldshtein, and M. Chertkov, “Control of line pack in natural gas system: Balancing limited resources under uncertainty,” in *PSIG Annual Meeting*, PSIG, 2023, p. PSIG-2314.
- [18] W. Zhang, Q. Tang, X. Gao, and R. Zhou, “Multi-Period Operational Modelling and Optimization for Large-Scale Natural Gas Networks Considering Linepack Functions in Long-Distance Transmission Pipelines,” *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 13, no. 2, p. 201, 2025.
- [19] “Backpropagation in Neural Network.” [Online]. Available: <https://www.geeksforgeeks.org/backpropagation-in-neural-network/>