



تحلیل رفتار دینامیکی خط لوله انتقال گاز در اثر تغییرات دبی جریان

گلناز مرادی^{۱*}، شهریار داری پور^۲، سید مصطفی حسینعلی پور^۳

^۱ کارشناس ارشد مکانیک، سازمان نظام مهندسی ساختمان استان ایلام

^۲ معاونت مهندسی و توسعه، شرکت پالایش گاز ایلام

^۳ دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

چکیده

در بررسی و مدل سازی شبکه خطوط انتقال گاز دو نوع جریان پایا و گذرا وجود دارد. مدل سازی جریان گذرا نسبت به جریان پایا پیچیده تر و مشکلتر است ولی به خوبی می تواند جوابگوی پیش بینی شبکه انتقال در حالات مختلف باشد. شبکه خطوط انتقال گاز شامل خط لوله، ایستگاه تقویت فشار، ایستگاه تقلیل فشار، شیرهای مسدودکننده و میادین ذخیره است که اثر هر یک در رفتار گذرای شبکه نسبت به دیگری کاملاً متفاوت است. در این تحقیق خط لوله بعنوان مهمترین پارامتر تاثیرگذار در رفتار گذرای شبکه انتقال گاز برای حالت گذرای همدم مدل سازی و بررسی شده است. مدل سازی خط لوله با استفاده از معادلات بقای جرم، ممنتوم و معادله حالت، منتهی به معادلات دیفرانسیلی جزئی می شود که باید نسبت به زمان و مکان حل شوند. در این تحقیق سه گزینه از شرایط عملیاتی خط لوله انتقال گاز در حالت گذرا مورد بررسی قرار گرفته است که نتایج مدل سازی هر یک بصورت منحنی های تغییرات دبی جریان و فشار در طول خط لوله برای زمان های مختلف رسم و تفسیر شده اند.

کلمات کلیدی: مدل سازی؛ خط لوله؛ جریان گذرا؛ گاز طبیعی.

۱- مقدمه

تولید تا مراکز توزیع است. توزیع گاز نیز فرآیند ارسال از مراکز توزیع تا مصرف کننده های جداگانه می باشد. در خط لوله دو نوع جریان پایا و گذرا را می توان در نظر گرفت [۱]. هنگامی که پارامترهای جریان گاز در سیستم مستقل از زمان باشند به عبارتی با زمان تغییر نکنند، سیستم در حالت پایا است. هرچند که در نظر گرفتن جریان حالت پایا تحت شرایط خاصی نتایج نسبتاً مناسبی را می دهد اما

انتقال گاز طبیعی از طریق خطوط لوله بهترین و مؤثرترین روش برای جابجایی گاز از تولید کننده ها تا مصرف کننده ها است. در حالت کلی جابجایی گاز به دو بخش انتقال و توزیع طبقه بندی می شود. انتقال گاز به مفهوم جابجایی حجم زیادی از گاز در فشار های بالا و مسافت های طولانی از منابع

تائو^۹ و تایی^{۱۰} [۱۱] با قیاس خطوط انتقال گاز با مدارهای الکتریکی و با معادل سازی پارامترهای سیالاتی و الکتریکی، رفتار خط لوله در حالت گذرا را مورد مطالعه قرار داده‌اند.

آسیادکز^{۱۱} [۱۲] با تبدیل معادلات دیفرانسیلی جزئی خط لوله به معادلات دیفرانسیلی معمولی و حل آنها با استفاده از روش رانج-کوتا، خط لوله در حالت گذرا را مدل سازی نموده‌است. در حالت کلی با در نظر گرفتن نوع انتقال جریان گاز در خط لوله دو گزینه مناسب برای مدلسازی جریان وجود دارد [۱۳]:

- جریان بدون تبادل حرارتی با زمین اطراف، آدیاباتیک و مخصوصاً جریان ایزونتروپیک

- جریان با تبادل حرارتی کامل با زمین اطراف (جریان هم‌دما)

مدل سازی حالت گذرای هم‌دما در خط لوله با استفاده از معادلات بقای جرم، ممنتوم و حالت منجر به معادلات دیفرانسیلی جزئی می‌گردد که باید نسبت به زمان و مکان حل شوند [۱۴]. این موضوع حل مسأله را مشکل تر می‌سازد به همین دلیل با استفاده از برخی فرضیات صحیح برای شرایط عملیاتی خط لوله، معادلات را ساده تر می‌کنند. به دلیل تنوع فرضیات انتخاب شده، مدل‌های ریاضی گوناگونی ایجاد می‌شود. در مدل سازی‌ها باید دو شرط اصلی مورد نظر باشند: اولاً مدل باید توصیف دقیقی از پدیده داشته باشد، ثانیاً تا حد امکان ساده باشد به طوری که محاسبات مورد نیاز برای حل آنها به راحتی انجام شود. به عنوان یک قانون باید گفت که مدل‌های ساده شده باید طوری ارائه شوند که تناسب معقول بین دقت توصیف مسأله و هزینه‌های حل بوجود آید [۱]. مدل‌های ساده شده با صرف نظر از برخی جملات مدل اصلی بدست می‌آیند. با توجه به میزان ساده سازی در معادلات پایه، معادلات حاصل ممکن است خطی یا کاملاً غیرخطی و به شکل سهموی یا هذلولی از مرتبه یک یا دو باشند.

پس از ارائه مدل ریاضی، گام مهم بعدی پیدا کردن روش حل عددی مناسب برای آن است به طوری که دقت قابل

امروزه به دلیل نوسانات شدید مصرف گاز، ناشی از مواردی چون نیروگاه‌های گازی تولید برق، تغییرات فصلی مصارف شهری، پیمان‌های کوتاه مدت فروش گاز و... دیگر نمی‌توان برای بررسی و آنالیز شبکه گازرسانی در کلیه شرایط از این حالت استفاده نمود. در شبکه‌های فشار پایین، حرکت و پویایی خیلی سریع است و برای مقاصد عملی می‌توان حالت گذرا را در نظر نگرفت و از مدل‌های حالت پایا استفاده نمود [۲]. در شبکه‌های فشار بالا، به دلیل مقادیر زیاد گاز ذخیره شده در لوله‌ها، حرکت و پویایی خیلی آهسته تر صورت می‌گیرد و نمی‌توان از تغییرات پارامترها نسبت به زمان چشم‌پوشی کرد [۳]. در چنین شرایطی برای دستیابی به نتایج صحیح آنالیز شبکه انتقال باید حالت رفتار گذرای سیستم مورد بررسی قرارگیرد.

در زمینه بررسی رفتار گاز در خط لوله تحقیقاتی انجام شده است که از آن جمله می‌توان به موارد زیر اشاره نمود.

شرودر^۱ [۴]، اویانگ و عزیز^۲ [۵]، هودز^۳ [۶] معادلات حاکم بر جریان تراکم پذیر در خط لوله را بررسی نموده و از شکل ساده معادلات عمومی جریان در حالت پایا جهت محاسبه افت فشار ناشی از اصطکاک، تغییر ارتفاع و انرژی جنبشی استفاده کرده‌اند.

استونر^۴ [۷] معادلات جبری غیر خطی مربوط به خطوط انتقال در حالت پایا شامل خط لوله، کمپرسور، شیر کنترلی و میادین ذخیره را با استفاده از روش نیوتن-رافسون حل نموده‌است.

هوون^۵ و گاسونی^۶ [۸] با خطی سازی معادلات غیر خطی، خط لوله در حالت پایا را شبیه سازی کرده‌اند.

دونان و همکاران^۷ [۹] با استفاده از نرم افزار Simulink خطوط لوله را شبیه سازی نموده‌اند. این نرم افزار در زمینه شبیه سازی خطوط لوله بسیار محدود است.

لونگو^۸ [۱۰] رفتار گذرای خط لوله در حالت هم‌دما را با حل معادلات از روش کرانک-نیکلسون بررسی کرده‌است.

¹ Schroeder

² Ouyang

³ Rhoads

⁴ Stoner

⁵ Hoeven

⁶ Gasunie

⁷ Donan

⁸ Luongo

⁹ Tao

¹⁰ Ti

¹¹ Osiadacz

$$\frac{\partial P}{\partial x} - \frac{2f\rho v^2}{D} - \rho g \sin \alpha = \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial x} \quad (3)$$

f ضریب اصطکاک و α زاویه بین افق و محور خط لوله است. پارامترهای $\frac{\partial(\rho v)}{\partial t}$ ، $\frac{2f\rho v^2}{D}$ ، $\rho g \sin \alpha$ و $\frac{\partial(\rho v^2)}{\partial x}$ به ترتیب بیانگر اینرسی، نیروی اصطکاک، نیروی جاذبه و فشار دینامیکی جریان گاز می‌باشند. با استفاده از معادله پیوستگی، معادله (۳) به شکل زیر بازنویسی می‌شود:

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial P}{\partial x} = -\frac{w}{A} - \rho g \sin \alpha \quad (4)$$

که $w = \frac{f\rho v|v|}{8} \pi D$ است.

۲-۳- معادله حالت

معادله سوم مورد نیاز برای حل جریان گاز در خط لوله، معادله حالت یا قانون گازها است.

$$\frac{P}{\rho} = \frac{ZRT}{M} \quad (5)$$

۳-۱- معادلات بقاء جرم و ممنتوم برای شرایط هم‌دم

یکی از مدل‌های بیان شده برای انتقال گاز در خط لوله، حالت تبادل حرارتی کامل با زمین اطراف لوله یا جریان هم‌دم است.

فرضیات لازم برای این حالت به قرار زیر است [۱۵]:

- فشار، دانسیته، سرعت و... برای جریان گاز یک بعدی فقط تابعی از زمان و طول در امتداد خط لوله است.
- دانسیته، فشار، سرعت را می‌توان به طور مناسب با مقدار متوسط آنها روی هر سطح مقطع بیان کرد.
- سطح مقطع لوله در امتداد مسیر جریان گاز ثابت است.
- انبساط در دیواره لوله را می‌توان نادیده گرفت.
- شعاع انحنای لوله در مقایسه با قطر لوله بزرگ است.
- پروفیل سرعت در طول لوله تقریباً ثابت است.
- ضریب اصطکاک در طول خط لوله ثابت است.

با استفاده از رابطه (۵) و نرخ دبی جرمی ($\dot{m} = \rho v A$) معادلات پیوستگی و ممنتوم به شکل زیر بازنویسی می‌شوند:

قبول و زمان محاسبه نسبتاً کمی داشته‌باشد. هدف تبدیل معادلات دیفرانسیلی جزئی به یک سیستم معادلات جبری گسسته و سپس حل آنها است. روش تفاضلات محدود یکی از روشهای مناسب برای این منظور است. این روش به دو نوع صریح و ضمنی تقسیم بندی می‌شود. استفاده از روش ضمنی دارای قابلیت انتخاب گام زمانی بدون محدودیت برای حل مدل است، در حالیکه روش صریح چنین ویژگی را ندارد. از دیدگاه محاسباتی، روش ضمنی نیازمند حل دستگاه معادلات جبری در هر قدم زمانی می‌باشد. اما در عین حال دستگاه معادلات حاصل پایدار بوده و می‌توان گام‌های زمانی حل مسأله را افزایش داد.

۲-۲- معادلات اساسی حاکم بر خط لوله انتقال گاز

جریان گذرای انتقال گاز در خطوط لوله را می‌توان به طور مناسب با یک دیدگاه یک بعدی توصیف کرد. معادلات اساسی توصیف جریان گاز هم‌دم در خطوط لوله، از معادله پیوستگی، معادله ممنتوم و معادله حالت نتیجه‌گیری می‌شوند.

۲-۱- معادله پیوستگی (بقا جرم)

بر طبق قانون بقای جرم، جرم نه تولید می‌شود و نه از بین می‌رود. بنابراین جرم یک حجم کنترل ثابت باقی می‌ماند، عموماً معادله پیوستگی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

v سرعت جریان و ρ دانسیته است.

۲-۲- بقاء ممنتوم یا قانون دوم حرکت نیوتن

قانون دوم نیوتن بیانگر این است که برآیند نیروهای عمل کننده روی یک ذره یا سیستم ذرات از گاز با جرم مشخص در یک زمان خاص برابر است با نرخ تغییرات ممنتوم ذره (سیستم ذرات) در آن لحظه. با در نظر گرفتن جهت خط جریان

$$\sum F_x = \frac{D}{Dt} (mv) \quad (2)$$

که F_x ترکیب نیروهای عمل کننده روی جزیی از گاز در جهت حرکت و m جرم جزء گاز مورد نظر است. شکل نهایی معادله (۲) برای خط لوله به صورت زیر می‌باشد:

101350	Pa	= فشار استاندارد
289	K	= دمای استاندارد
310	K	= دمای میانگین
18	gr/mol	= وزن مولکولی گاز
8.31447	J/(mol °K)	= R
0.86		= ضریب تراکم‌پذیری
0.008		= ضریب اصطکاک

$$\frac{\partial P}{\partial t} + ZRT \frac{\partial \left(\frac{\dot{m}}{A}\right)}{\partial x} = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial \left(\frac{\dot{m}}{A}\right)}{\partial t} + ZRT \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\frac{\dot{m}}{A}\right)^2 \frac{1}{P} \right) + \frac{\partial P}{\partial x} + \left(\frac{fZRT}{2D} \right) \frac{\left(\frac{\dot{m}}{A}\right) \left| \frac{\dot{m}}{A} \right|}{P} + \frac{P g \sin \alpha}{ZRT} = 0 \quad (7)$$

با توجه به تراکم و فشار بالای گاز در خطوط انتقال و فرض کوچک بودن سرعت جریان، همچنین فرض افقی بودن خط انتقال، رابطه (۷) را می‌توان به شکل دیگر بازنویسی کرد:

$$\frac{\partial \left(\frac{\dot{m}}{A}\right)}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} + \left(\frac{fZRT}{2D} \right) \frac{\left(\frac{\dot{m}}{A}\right) \left| \frac{\dot{m}}{A} \right|}{P} = 0 \quad (8)$$

با جایگذاری پارامترهای لازم بر اساس تفاضلات محدود کاملاً ضمنی در معادلات (۶) و (۸)، معادلات نهایی حاکم بر خط لوله به شکل ذیل بیان می‌شوند:

$$\frac{P_{i+1}^{n+1} + P_i^{n+1} - P_{i+1}^n - P_i^n}{2\Delta t} + \frac{(m_{i+1}^{n+1} - m_i^{n+1})ZRTA}{\Delta x} = 0 \quad (9)$$

$$\frac{m_{i+1}^{n+1} + m_i^{n+1} - m_{i+1}^n - m_i^n}{2A\Delta t} + \frac{P_{i+1}^{n+1} - P_i^{n+1}}{\Delta x} + \left(\frac{fZRT}{4D} \right) \times |m_{i+1}^{n+1} + m_i^{n+1}| \times \frac{m_{i+1}^{n+1} + m_i^{n+1}}{P_{i+1}^{n+1} + P_i^{n+1}} = 0 \quad (10)$$

که مکان با نماد i و زمان با n نشان داده شده است.

دستگاه معادلات فوق غیر خطی است و باید برای هر گام زمانی در طول خط لوله یکجا حل شود. در این تحقیق برای حل دستگاه معادلات فوق از روش نیوتن-رافسون استفاده شده است.

شرایط عمومی استفاده شده در مدل سازی و محاسبات به شرح زیر در نظر گرفته شده است:

۴- نتایج

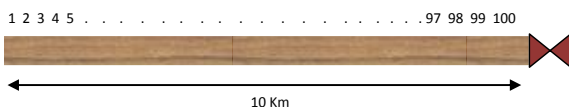
در این بخش سه گزینه مختلف از شرایط بهره برداری برای حالت گذرا در خط لوله انتقال گاز مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج مدل سازی هر یک از گزینه‌ها به صورت منحنی‌های تغییرات فشار و نرخ جریان در طول لوله نسبت به زمان ارائه شده و هر یک به تفصیل مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۴-۱- مورد مطالعه اول

مورد اول، بررسی خط لوله‌ای است که ابتدای آن به یک تامین کننده گاز با فشار ثابت و خروجی آن منتهی به یک شیر جهت کنترل مصرف جریان گاز است. خط در ابتدا به دلیل بسته بودن شیر خروجی بدون جریان و تحت فشار ثابت است که با باز و بسته نمودن شیر در زمانهای معین، دبی‌های جریان مشخص از انتهای آن گرفته می‌شود.

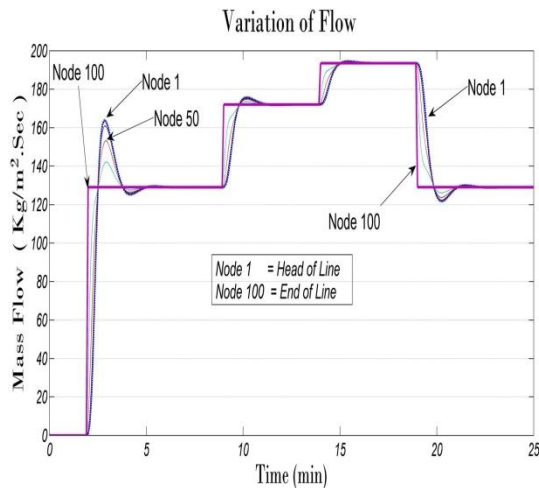
خط لوله دارای مشخصات به طول ۱۰ km و قطر داخلی ۵۰۰ mm است که طول آن به ۱۰۰ نقطه تقسیم شده و گام زمانی ۵ sec برای حل دستگاه معادلات، مد نظر قرار گرفته است.

بنا بر فرضیات فوق شرایط مرزی شامل فشار ورودی ثابت و دبی خروجی معین است.

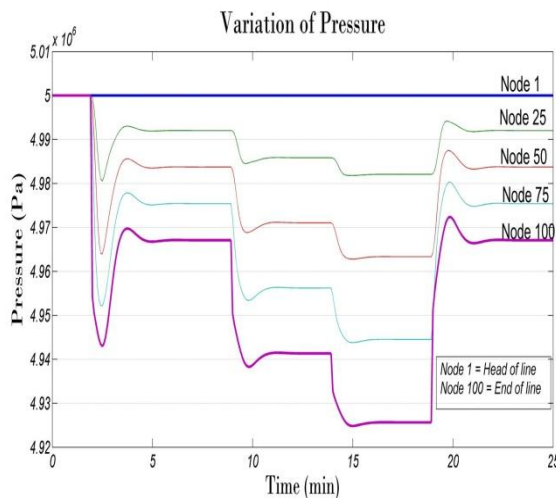


شکل ۱- خط لوله مورد مطالعه ۱

گرادیان فشار در طول خط لوله همانند مرحله اول شود که این موضوع در شکل ۳ به وضوح دیده می‌شود.



شکل ۲- تغییرات دبی در ابتدا، انتها و دیگر نقاط لوله



شکل ۳- تغییرات فشار در ابتدا و انتها و دیگر نقاط لوله

۴-۲- مورد مطالعه دوم

هدف از این مورد مطالعه، بررسی تاثیر طول خط لوله انتقال گاز بر رفتار گذرای آن است. به همین منظور خط لوله‌ای مشابه مورد مطالعه اول با طول دو برابر یعنی ۲۰ km در نظر گرفته شده است که کلیه مراحل تغییر میزان دبی جریان در آن نیز همانند مورد مطالعه اول است.

ابتدا خط لوله در حالت بسته بودن شیر خروجی، تحت فشار ۵ MPa و بدون جریان است.

مرحله اول: در دقیقه دوم شیر خروجی خط به میزانی باز شده که جریانی معادل $129 \text{ Kg}/(\text{m}^2.\text{sec})$ از آن عبور کند.

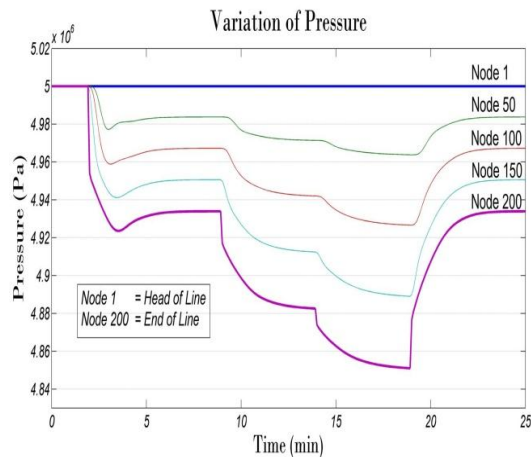
مرحله دوم: پس از پایدار شدن شرایط در دقیقه نهم با باز نمودن مجدد شیر، جریان خروجی به $176 \text{ Kg}/(\text{m}^2.\text{sec})$ افزایش داده می‌شود.

مرحله سوم: در دقیقه چهاردهم با بیشتر باز نمودن شیر، میزان جریان خروجی به $198 \text{ Kg}/(\text{m}^2.\text{sec})$ افزایش داده می‌شود.

مرحله چهارم: در دقیقه نوزدهم با بستن شیر خروجی، میزان جریان به اندازه مرحله اول یعنی $129 \text{ Kg}/(\text{m}^2.\text{sec})$ کاهش داده می‌شود تا بتوان پس از رسیدن به حالت پایدار، شرایط بدست آمده در طول خط لوله را با مرحله اول مقایسه نمود.

شکل ۲ تغییرات دبی جریان در نقاط مختلف لوله ناشی از باز یا بسته نمودن شیر خروجی را نسبت به زمان نشان می‌دهد. اثر هر تغییر میزان جریان در انتهای خط لوله، با تاخیر زمانی در دیگر نقاط خط دیده می‌شود به طوریکه تغییر دبی جریان در نقاط نزدیک به خروجی، زودتر از نقاط دورتر مشاهده می‌شود. شکل نشان می‌دهد که در هر مرحله پس از گذشت مدت زمان لازم، دبی جریان در کلیه نقاط لوله به اندازه دبی جریان خروجی خواهد شد که این امر نشان دهنده برقرار شدن شرایط پایدار در طول خط لوله است.

شکل ۳ بیانگر تغییرات فشار در طول خط لوله، ناشی از تغییر میزان جریان در شیر خروجی است. مشاهده می‌شود در مراحل اول تا سوم در هر مرحله با افزایش دبی جریان، فشار در نقاط مختلف خط نسبت به مرحله قبل کاهش می‌یابد که این موضوع به دلیل افزایش افت فشار ناشی از اصطکاک است. در هر یک از این مراحل دیده می‌شود که فشار نقاط پس از گذشت مدت زمان لازم بدون تغییر و ثابت می‌شوند که این موضوع نشان دهنده عبور از حالت گذرا و رسیدن به شرایط پایا در سیستم است. در مرحله چهارم با کاهش دبی جریان تا میزان مرحله اول، انتظار می‌رود که پس از گذشت مدت زمان لازم و پایدار شدن سیستم،



شکل ۵- تغییرات فشار در ابتدا و انتها و دیگر نقاط لوله

شکل ۵ بیانگر تغییرات فشار در نقاط مختلف خط لوله، ناشی از تغییر دبی جریان در شیر خروجی است. نرخ تغییرات فشار همانند شکل ۳ می‌باشد و با افزایش دبی در مراحل اول تا سوم، فشار نقاط نسبت به مرحله قبل کاهش یافته ولی در مرحله چهارم با کاهش نرخ دبی شیر خروجی، فشار نقاط افزایش می‌یابند. در مراحل اول و چهارم دیده می‌شود که پس از گذشت مدت زمان لازم، فشار نقاط به حالت ثابت می‌رسند که این امر نشان دهنده عبور از حالت گذرا و رسیدن به شرایط پایا در طول خط لوله است، در حالی که در مراحل دوم و سوم هنوز فشار نقاط به پایداری نرسیده و سیستم هنوز در شرایط گذرا می‌باشد که تغییر مرحله بعدی، باعث ایجاد شرایط گذرای جدید شده است.

۴-۳- مقایسه بین مورد مطالعه اول و دوم

از آنجایی که تنها تفاوت بین مورد مطالعه اول و دوم، صرفاً طول خط لوله می‌باشد بنابراین مقایسه بین نتایج آنها بیان کننده اثر طول لوله در رفتار گذرای خط لوله انتقال گاز خواهد بود.

شکل ۶ مقایسه بین تغییرات دبی جریان در طول خط لوله برای مورد مطالعه اول و دوم را نشان می‌دهد. همچنان که بیان شد تغییرات دبی جریان در طول خط لوله نسبت به تغییر جریان در شیر خروجی، با تاخیر زمانی دیده می‌شود. نکته قابل توجه در شکل ۶ این است که تغییرات دبی در

ابتدا خط لوله بدون جریان و دارای فشار گاز معادل ۵ MPa است.

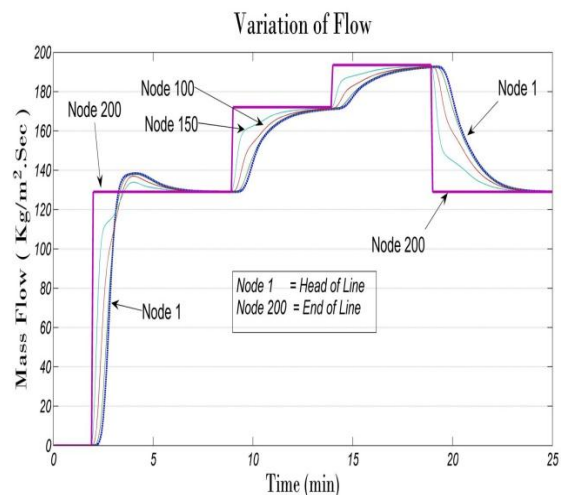
مرحله اول: در دقیقه دوم با باز نمودن شیر خروجی، جریانی معادل $129 \text{ Kg/(m}^2\cdot\text{sec)}$ از آن عبور کند.

مرحله دوم: در دقیقه نهم، جریان خروجی با باز نمودن مجدد شیر به $176 \text{ Kg/(m}^2\cdot\text{sec)}$ افزایش داده می‌شود.

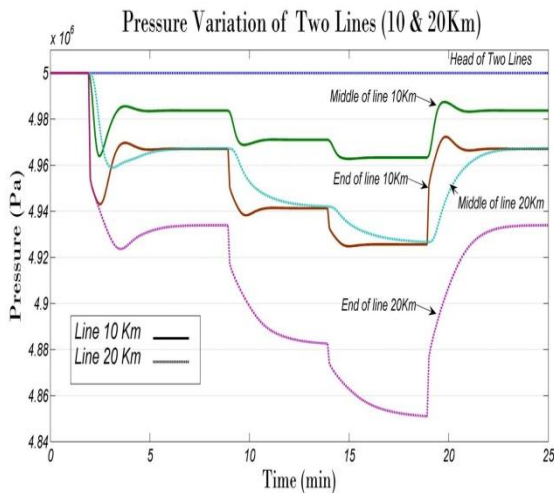
مرحله سوم: با بیشتر باز نمودن شیر در دقیقه چهاردهم، میزان جریان خروجی به $198 \text{ Kg/(m}^2\cdot\text{sec)}$ تغییر داده می‌شود.

مرحله چهارم: با بستن شیر خروجی، میزان جریان در دقیقه نوزدهم به اندازه مرحله اول یعنی $129 \text{ Kg/(m}^2\cdot\text{sec)}$ کاهش داده می‌شود.

شکل ۴ تغییرات دبی جریان در طول خط لوله ناشی از تغییر جریان در شیر خروجی را نسبت به زمان نشان می‌دهد. این شکل بیان می‌کند که متناظر با کاهش یا افزایش دبی جریان در شیر خروجی، دبی جریان در دیگر نقاط لوله با تاخیر زمانی کاهش یا افزایش می‌یابد. تغییر دبی در نقاط دورتر از شیر خروجی، دیرتر ظاهر می‌شود. در مراحل اول و چهارم پس از گذشت مدت زمان لازم که سیستم از حالت گذرا به حالت پایا می‌رسد، دبی جریان در کلیه نقاط خط لوله یکسان می‌شود.



شکل ۴- تغییرات دبی در ابتدا، انتها و دیگر نقاط لوله



شکل ۷- تغییرات فشار در دو لوله مورد مطالعه اول و دوم

۴-۴- مورد مطالعه ۳

هدف از این مورد مطالعه، بررسی رفتار دینامیکی هنگام به صفر رساندن دبی جریان خط لوله در مدت زمان بسیار کوتاه است. این اتفاق با بسته شدن ناگهانی و سریع شیر در مسیر عبور جریان گاز ایجاد می‌شود که در فرآیندهای عملیاتی در شیرهای^۱ L.B.V انتقال گاز و شیرهای^۲ E.S.D.V در پالایشگاه‌های گاز رخ می‌دهد. به همین منظور خط لوله ای با شیر خروجی بسته و تحت فشار ثابت در نظر گرفته شده است که ابتدا شیر باز شده و پس از مدت زمانی به طور ناگهانی کاملاً بسته می‌شود.

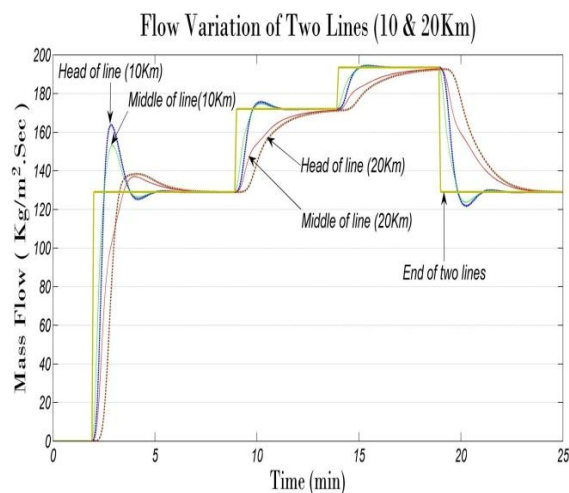
خط لوله با مشخصات به قرار طول ۱۵ km و قطر داخلی ۵۰۰ mm است که طول آن به ۱۵۰ نقطه تقسیم شده و گام زمانی ۵ sec برای حل دستگاه معادلات، مد نظر قرار گرفته است.

شرایط مرزی همانند مورد مطالعه اول شامل فشار ورودی ثابت و دبی خروجی معین است.

ابتدا خروجی بسته و خط تحت فشار ۵ MPa است. پس از دو دقیقه خروجی باز و ($220 \text{ Kg}/(\text{m}^2.\text{sec})$) از آن عبور می‌کند. پس از پایداری جریان، در دقیقه دهم خروجی بطور ناگهانی بسته می‌شود و جریان خروجی صفر می‌گردد.

طول خط، برای لوله با طول بیشتر با آهنگ کندتر و تأخیر زمانی بیشتری نسبت به لوله کوتاه تر صورت می‌گیرد و به همین علت، شرایط در خط لوله بلندتر دیرتر از حالت گذرا به حالت پایا می‌رسد. این مطلب با مقایسه بین تغییرات دبی جریان در فاصله ۱۰ کیلومتر از انتهای لوله ها، یعنی ابتدای خط لوله مورد مطالعه اول و وسط خط لوله مورد مطالعه دوم به خوبی مشهود است

شکل ۷ مقایسه تغییرات فشار در طول خطوط لوله مورد مطالعه اول و دوم را نشان می‌دهد. در این شکل نیز کند بودن نرخ تغییر فشار نسبت به زمان، برای خط لوله با طول بیشتر دیده می‌شود. در مورد مطالعه اول، در هر مرحله تغییر دبی جریان، شرایط فشار خط لوله از حالت گذرا عبور و به حالت پایا رسیده است، این در حالی است که برای مورد مطالعه دوم در مراحل دوم و سوم تغییر دبی جریان، سیستم هنوز در حال عبور از حالت گذرا است و به حالت پایا نرسیده است. نکته قابل توجه این است که در مراحل یکسان تغییر برای هر دو مورد مطالعه پس از گذشت مدت زمان لازم و رسیدن به حالت پایا، برای نقاط با فاصله یکسان از ابتدای خط لوله میزان افت فشار به یک اندازه خواهد بود. این موضوع در مقایسه انتهای خط لوله مورد مطالعه اول با وسط خط لوله مورد مطالعه دوم که هر دو به میزان ۱۰ کیلومتر از ابتدای لوله فاصله دارند به خوبی دیده می‌شود.

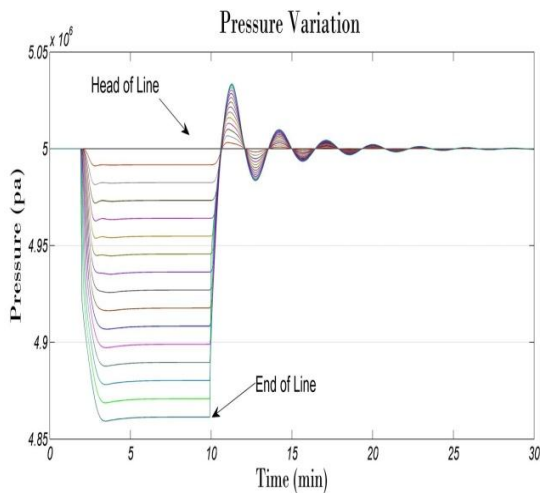


شکل ۶- تغییرات دبی در دو لوله مورد مطالعه اول و دوم

¹ Line Break Valve

² Emergency Shut Down Valve

حالت گذرا و رسیدن به حالت پایا، فشار در کلیه نقاط ثابت می‌شود. هنگامیکه شیر خروجی بطور ناگهانی بسته و جریان قطع می‌شود، به دلیل شرط مرزی فشار ثابت در ورودی، فشار کلیه نقاط در طول خط لوله به سمت فشار ورودی سیر می‌کند. در این میان بدلیل پدیده انتشار موج فشار ناشی از بسته شدن سریع شیر، نوساناتی با پریود یکسان و دامنه متفاوت در فشار کلیه نقاط ایجاد می‌شود که در پایان پس از گذشت مدت زمان لازم و رسیدن به شرایط پایا، فشار کلیه نقاط لوله یکسان و معادل فشار ورودی خواهد شد. همچنین در شکل ۹ دیده می‌شود که در نقاط نزدیکتر به شیر خروجی نوسانات فشار بیشتر از نقاط ابتدای لوله است در حالی که نوسانات دبی برای این نقاط، کمتر است.



شکل ۹- تغییرات فشار در طول خط لوله

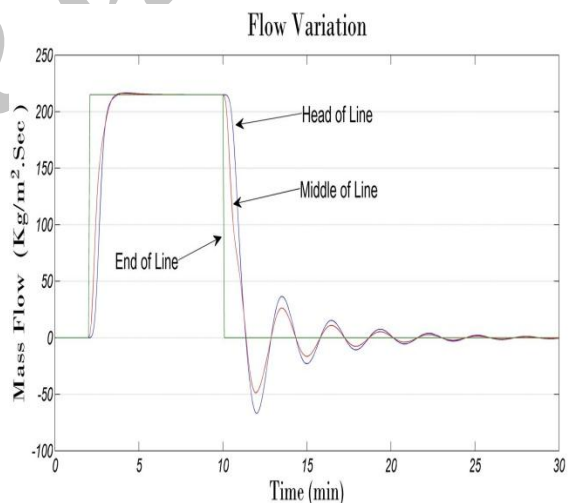
۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، اثرات تغییر دبی جریان در خط لوله به عنوان مهمترین عامل رفتار دینامیکی شبکه انتقال گاز، در سه حالت مختلف مدل سازی گردید و نتایج بدست آمده مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. در مقایسه نتایج دو لوله با طول متفاوت، مشخص شد در کاهش یا افزایش یکسان دبی خروجی از خط لوله با افزایش طول آن، آهنگ تغییرات دبی و فشار در دیگر نقاط خط لوله کاهش یافته و رسیدن به شرایط پایا و عبور از حالت گذرا برای لوله با طول بیشتر، مستلزم گذشت مدت زمان بیشتر است. به عبارت دیگر هر چه قدر طول خط لوله انتقال گاز بیشتر باشد، رفتار

شکل ۸ بیانگر تغییرات دبی در سه موقعیت از خط لوله یعنی انتها، وسط و ابتدای آن می‌باشد.

هنگامی که شیر خروجی باز می‌گردد، شرایط گذرا در طول خط لوله ایجاد شده و عبور جریان در دیگر نقاط لوله انجام می‌پذیرد. پس از گذشت مدت زمان لازم که نرخ دبی جریان در انتها و ابتدای خط لوله یکسان شد، سیستم به حالت پایا رسیده است.

وقتی شیر خروجی به طور ناگهانی بسته می‌شود، دبی جریان عبوری از آن سریعاً صفر می‌شود و این عمل باعث ایجاد شرایط گذرای جدیدی خواهد بود که در پایان آن و رسیدن به حالت پایا، دبی جریان عبوری در کلیه نقاط خط لوله صفر خواهد شد. در شکل ۸ دیده می‌شود که پس از بسته شدن ناگهانی شیر، نوساناتی ناشی از انتشار موج فشار در طول لوله با فرکانس یکسان اما دامنه متفاوت ایجاد می‌شود که بیان کننده ضربه قوچ است و به دلیل ماهیت تراکم پذیری گاز، مدت زمانی طول می‌کشد تا در نهایت این نوسانات میرا شده و جریان در کل خط لوله صفر شود.



شکل ۸- تغییرات دبی در ابتدا، وسط و انتهای لوله

شکل ۹ بیانگر تغییرات فشار در نقاط مختلف خط لوله است. قبل از باز شدن شیر که خط لوله تحت فشار است، فشار در کلیه نقاط ثابت و یکسان است. هنگامی که شیر خروجی باز می‌شود و جریان برقرار می‌گردد، فشار نقاط از ابتدا به سمت انتهای لوله بدلیل افت ناشی از اصطکاک کاهش می‌یابد. پس از گذشت مدت زمان لازم و عبور از

- [3] Gato LMC, Henriques JCC (2005) Dynamic behaviour of high-pressure natural-gas flow in pipelines. *Int J Heat Fluid Flow*: 817–825.
- [4] Schroeder DW (2001) A tutorial on pipe flow equations. 3rd annual meeting pipeline simulation interest group (PSIG), Salt Lake City, Utah, Oct.17–19.
- [5] Ouyang L, Aziz K (1996) Steady-state gas flow in pipes. *J Petrol Sci Eng*: 137–158.
- [6] Rhoads GA (1983) Which flow equation - Does it matter?. 15th annual meeting pipeline simulation interest group (PSIG), Detroit, Michigan, Oct. 27–28.
- [7] Stoner MA (1969) Steady- state analysis of gas production transmission and distribution systems. Meeting society of petroleum engineers of AIME, Denever, Colorado, 28 Sep.–1 Oct.
- [8] Hoeven TV, Gasunie NVN (1992) Some athematical aspects of gas network simulation. 24th annual meeting pipeline simulation interest group (PSIG), Corpus Christi, Texas, Oct. 22–23.
- [9] Doonan AF, Fletcher I, Cox CS, Arden WJB (1998) Evaluation of a remote boundary pressure control strategy using SIMULINKTM. Proceeding from UKACC International Conference on Control' 98(455): 129-134, Sep. 1–4.
- [10] Luongo CA (1986) An efficient program for transient flow simulation in natural gas pipelines. 15th annual meeting pipeline simulation interest group (PSIG), New Orleans, Louisiana, Oct. 30–31.
- [11] Tao WQ, Ti HC (1998) Transient analysis of gas pipeline network. *Chem Eng J*, No. 69: 47–52.
- [12] Osiadacz AJ (1987) Simulation and analysis of gas networks. Gulf Publishing Company, Houston, Texas.
- [13] Tao WQ, Ti HC (1998) Transient analysis of gas pipeline network. *Chem Eng J*, No. 69: 47–52.
- [14] Luongo CA (1986) An efficient program for transient flow simulation in natural gas pipelines. 15th annual meeting pipeline simulation interest group (PSIG), New Orleans, Louisiana, Oct. 30–31.
- [15] Hati A, Verma N, Chhabra R (2001) Transient analysis of gas flow in a straight pipe. *Can J Chem Eng*, 1: 18–27.

دینامیکی ناشی از تغییر دبی جریان در بازه زمانی بیشتری رخ خواهد داد. همچنین نشان داده شد که بسته شدن آنی شیر در مسیر عبور جریان، باعث ایجاد ضربات موج فشاری خواهد شد که مدتی طول خواهد کشید تا این موج میرا شود.

۶- علایم و نشانه‌ها

A	سطح مقطع لوله m^2
D	قطر لوله m
f	ضریب اصطکاک
g	شتاب جاذبه m/s^2
L	طول لوله m
m	وزن مولکولی g/mol
\dot{m}	دبی جرمی kg/sec
P	فشار Pa
R	ثابت عمومی گازها $J/(mol \ ^\circ K)$
t	زمان sec
v	سرعت گاز در جهت محور لوله m/sec
x	جهت محور لوله
Z	ضریب تراکم‌پذیری
α	زاویه بین محور لوله و افق
ρ	دانسیتته kg/m^3

مراجع

- [1] Santos SP (1997) Transient analysis, a must in gas pipeline design. 29th annual meeting pipeline simulation interest group (PSIG), Tucson, Arizona, Oct. 15–17.
- [2] Ouyang L, Aziz K (1996) Steady-state gas flow in pipes. *J Petrol Sci Eng*: 137–158.