

((یادداشت مهندسی))

# بررسی آزمایشگاهی عملکرد سامانه تشخیص شکست خط لوله گاز در

## عملگرهای ربع گرد

مهدی محمودی<sup>۱</sup> و مفید گرجی<sup>۲</sup>

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

(تاریخ دریافت: ۹۵/۷/۲۵؛ تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۰/۱۸)

### چکیده

در عملگرهای دارای سامانه تشخیص شکست خط لوله به دلایل متعدد در مناطقی با عدم دسترسی به شبکه سراسری برق، دارای شرایط صعب‌العبور، یا با هدف نیاز به ایجاد شرایط پدافند غیرعامل و یا حفاظت از زیست‌بوم‌هایی همچون رودخانه و جنگل روی خطوط انتقال نفت و گاز نصب می‌شوند تا از هدر رفتن این مواد به هنگام نشتی یا شکست خط جلوگیری نمایند. اثر مشخصه‌های قطر اوریفیس موجود در سامانه، فشار اولیه خط لوله و نرخ افت فشار ناشی از شکست خط بر اختلاف فشار طرفین شیر دیافراگمی در سامانه تشخیص شکست خط به صورت آزمایشگاهی با گاز نیتروژن بررسی شده است. بیشینه اختلاف فشار طرفین شیر دیافراگمی جهت تنظیم بار اعمالی به فنر شیر ۳/۲ دارای اهمیت بالایی است، زیرا سیال پرفشار نیتروژن در حالت آماده‌باش قبل از شیر قرار دارد که با رسیدن اختلاف فشار طرفین شیر دیافراگمی به مقدار تنظیمی فنر سبب تغییر وضعیت آن و در نتیجه عملکرد عملگر می‌شود. با افزایش نرخ افت فشار شکست خط، کاهش قطر اوریفیس و یا کاهش فشار اولیه خط لوله، اختلاف فشار طرفین دیافراگم (بین مخزن مرجع و خط لوله) افزایش می‌یابد. مقدار زمان دستیابی به اختلاف فشار بیشینه طرفین شیر دیافراگمی (معیار عملکردی عملگر) تنها به اندازه قطر اوریفیس بستگی دارد و مستقل از فشار اولیه خط لوله و افت فشار شکست است که با افزایش قطر اوریفیس، کاهش می‌یابد. نمودار اختلاف فشار بیشینه بر حسب نرخ افت فشار شکست برای مقادیر مختلف فشارهای اولیه خط لوله و قطرهای اوریفیس ارائه شده که مبنای طراحی و تنظیم این نوع عملگر پرکاربرد و با اهمیت در خطوط انتقال گاز می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** بررسی آزمایشگاهی، سامانه تشخیص شکست، عملگر شیرهای خط لوله گاز، قطر اوریفیس، نرخ افت فشار

## An Experimental Study on Gas Line Break Detection System in Quarter Turn Actuators

M. Mahmoodi and M. Gorji

Mechanical Engineering Dep't. Babol University of Science and Technology      Mechanical Engineering Dep't. Babol University of Science and Technology

(Received: 16/October/2016; Accepted: 7/January/2017)

### ABSTRACT

In this paper the effects of orifice diameter, pipeline initial pressure and pipeline break pressure drop rate on the differential pressure of diaphragm valve in a quarter turn Scotch-Yoke actuator have been studied experimentally. The gas in this study was nitrogen. The pipeline break causes a growth in oil speed and fluid pressure reduction consequently. However pressure drop is not a good signal for line break detection, because it is low and this reference tank is used. The reference tank is connected to the pipeline through a calibrated orifice with a check valve. The tank pressure is higher than the pipeline pressure, when pressure reduction occurs by line breaking. If the pressure difference between the tank and the pipeline is higher than the sustainable pressure value of diaphragm valve, the valve will be closed by an actuator. This study shows the following conclusions differential pressure of diaphragm valve is increased by the growth of pipeline break pressure drop rate. The occurrence time of maximum differential pressure of diaphragm valve is constant for all different break pressure drop rate and initial pressure of pipeline with the same orifice diameter. The maximum of differential pressure increases with the decrease of orifice diameter. The differential pressure of diaphragm valve increases by decrease of pipeline initial pressure for constant orifice diameters and pipeline break pressure drop rates. The curves of maximum differential pressure generated by different pipeline break pressure drop rates are shown for different orifice diameters and pipeline initial pressure. These important curves will be used for the design and the setting of these actuators operation.

**Keywords:** Experimental Study, Break Detection System, Valve Actuator, Orifice diameter, Pressure Drop Rate

۱- دانشجوی دکتری: mmahmoodi@stu.nit.ac.ir

۲- استاد (نویسنده پاسخگو): gorji@nit.ac.ir

## فهرست علائم و اختصارات

$D$	قطر اوریفیس، m
$g$	شتاب گرانش، $m/s^2$
$\dot{m}_{ACC}$	دبی جرمی خروجی از مخزن مرجع، $kg/s$
$\dot{m}_{PL}$	دبی جرمی خروجی از خط لوله، $kg/s$
$P$	فشار، $kg/m.s^2$
$P_i$	فشار اولیه خط لوله، $kg/m.s^2$
$t$	زمان، s
$V$	سرعت، m/s

## علائم یونانی

$\nu$	لزجت سینماتیکی $m^2/s$
$\rho$	چگالی $kg/m^3$

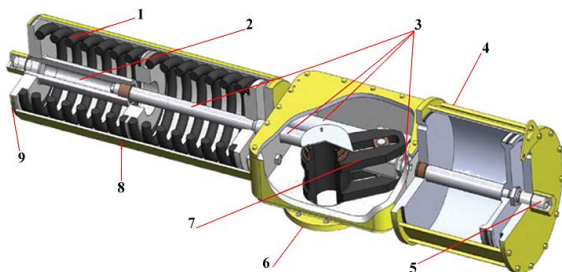
## ۱- مقدمه

عملگرهای<sup>۱</sup> دارای سامانه تشخیص شکست خطوط انتقال نفت و گاز، ابزاری هستند که به وسیله منابع انرژی نصب شده روی آن‌ها از جمله هوا یا نیتروژن یا روغن فشرده، موتور و جعبه دنده، فنر و یا فشار خط به منظور عملکرد خودکار، کنترل از راه دور یا حالتی که نیروی زیادی برای تغییر وضعیت شیر اعم از باز و بسته نمودن یا کنترل دبی عبوری نیاز است، استفاده می‌شوند. عملگرها در حالت کلی به دو دسته خطی و دورانی تقسیم می‌شوند. عملگرهای خطی برای کنترل شیر، نیروی خطی تولید می‌نمایند، همانند عملگرهایی که روی شیرهای دوازه‌ای<sup>۲</sup> و بشقابی<sup>۳</sup> نصب می‌شوند.

عملگرهای دورانی بر روی شیرهایی که با چرخش کنترل می‌شوند، مثل شیرهای توپی<sup>۴</sup> و پروانه‌ای<sup>۵</sup> نصب می‌گردند و بسته به نوع شیر، که جهت کنترل آن به یک یا چند دور چرخیدن ساقه شیر نیاز باشد، به دو دسته چند دور چرخش<sup>۶</sup> و دوران ناقص<sup>۷</sup> تقسیم می‌گردند. عملگرهای دوران ناقص که بسیار در صنعت خطوط لوله انتقال نفت و گاز کاربرد دارند را ربع‌گرد<sup>۸</sup> می‌نامند. عملگرهای ربع‌گرد را از نظر ساختار مکانیکی

می‌توان به سه دسته؛ عملگر یوک شیاردار<sup>۹</sup> (شکل ۱)، عملگر پره دوار<sup>۱۰</sup>، عملگر چرخ و شانه<sup>۱۱</sup> تقسیم کرد [۱].

اجزای عملگرهای یوک شیاردار به شرح زیر است: (۱) فنر، (۲) راهنمای فنر، (۳) شاتون و میله‌های راهنمای پیستون، (۴) سیلندر، (۵) استاپر، (۶) فلنچ، (۷) یوک، (۸) محافظ فنر و (۹) نگهدارنده فنر. عملگرهای نوع یوک شیاردار، منطبق بر شیرهای توپی بوده و در شیرهای نسل جدید به ندرت می‌توان بر روی شیرهای توپی، عملگر نصبی اتوماتیکی غیر از این نوع یافت. در قرن نوزده میلادی در قطارهای مسافری، اولین نمونه‌های ساختار و مکانیزم یوک استفاده شد که نقش تبدیل نیروی محرکه خطی به دورانی و انتقال نیروی آن به چرخ‌ها را بر عهده داشته است [۲]. مهمترین ویژگی مکانیزم یوک که سبب کاربرد گسترده آن در عملگرها شده است، تولید گشتاور متناسب با کورس حرکتی مورد نیاز شیرهای دورانی می‌باشد، به نحوی که مقدار گشتاور تولیدی در نقاط ابتدا و انتهای حرکت بیشتر و در نقاط میانی کمتر است. از سوی دیگر، هزینه ساخت عملگرهای نوع یوک به ویژه جهت تولید گشتاور بالاتر، کمتر از سایر انواع عملگرها است. فشار عملکردی لازم، به‌طور مستقیم از فشار خط لوله (خطوط انتقال گاز) و یا از فشار تانک مجزای نیتروژن (خطوط انتقال نفت)، وارد مخازن عملگر شده و با اعمال فشار بر روغن موجود در مخازن سبب می‌گردد تا از طریق لوله‌های ارتباطی، روغن پر فشار وارد سیلندر شده و پیستون را جابجا نماید. حرکت خطی لغزنده موجود در انتهای شاتون متصل به پیستون از طریق یوک به حرکت دورانی تبدیل شده و در نتیجه سبب چرخش ساقه شیر می‌گردد که در نهایت، شیر را باز یا بسته می‌نماید.



شکل (۱): عملگر ربع‌گرد یوک شیاردار [۱].

- 9- Scotch-Yoke  
10- Rotary Vane  
11- Rack and Pinion

- 1- Actuators  
2- Gate Valve  
3- Globe Valve  
4- Ball Valve  
5- Butterfly Valve  
6- Multi-turn  
7- Partial-turn  
8- Quarter-turn

عملگرها دارای قابلیت اعتماد بالا، نگهداری و تعمیر ساده، وزن کم و توان تولیدی بالا می‌باشند که در هواپیماها نیز به کار گرفته می‌شوند.

هاریس<sup>۹</sup> و همکاران [۱۲] به بررسی روش بهینه‌سازی مصرف انرژی عملگر الکتروپنوماتیکی به هدف کسب بیشینه قدرت از آن پرداختند. لیو<sup>۱۰</sup> و همکاران [۱۳] به بررسی آزمایشگاهی عملگرهای میکرو پرداختند و سرعت متوسط سیال را برای توان‌های تولیدی بیشینه به منظور بهینه‌سازی سیستم بررسی نمودند. گو<sup>۱۱</sup> و همکاران [۱۴] به شبیه‌سازی نیروهای درگیر با عملگری با سیلندر یک طرفه پرداخته و نیروهای تولیدی و مستهلک کننده با حضور اغتشاشاتی همچون اصطکاک و سایر نیروهای خارجی را بررسی نمودند.

عملگرهای یوک شیاردار با سامانه تشخیص شکست خط، به دلیل حساسیت زیاد بر نرخ تغییرات فشار نسبت به زمان، نیازمند تنظیمات دقیقی هستند که اغلب با صرف زمان و هزینه زیاد به صورت تجربی تنظیم می‌گردند و با اشکالات و خطاهای زیادی به همراه بهره‌برداری مواجه می‌گردند زیرا تنظیم سامانه تشخیص شکست خط در عملگر نیاز به آگاهی از نرخ تغییرات افت فشار داخلی (ذات سامانه تشخیص شکست خط عملگر) و خارجی (سامانه لوله‌کشی خطوط انتقال و میزان دبی شاخه‌های مصرفی یا تزریقی به خط لوله) دارد و تنها با کمک روابط اساسی و عمومی در مکانیک سیالات قابل رسم نمی‌باشد. افت فشار خارجی در حالت طبیعی شامل افت فشار اصطکاکی در خط لوله و اتصالات آن از قبیل زانویی و ونتوری و ... و نیز میزان دبی مصرفی از خطوط لوله در مسیر عبوری آن می‌باشد که این نوع افت فشار، طبیعی بوده و نباید سبب عمل نمودن عملگر شود. اختلاف فشار طرفین شیر اختلاف فشار با رخ دادن شکست در خط لوله با زمان متغیر است و دارای یک حد بیشینه می‌باشد که عملگر با این حد بیشینه تنظیم می‌گردد و با رسیدن سوئیچ به این اختلاف فشار، در یک لحظه عمل کرده و شیر را می‌بندد. این اختلاف فشار طرفین سوئیچ به پارامترهای متعددی از قبیل، فشار اولیه خط لوله، نرخ افت فشار خط لوله در لحظه شکست، قطر اوریفیس و هندسه اجزای عملگر در مسیر سیال وابسته است.

برخی از مشکلات عملگرهای دارای سامانه تشخیص شکست خط نصب شده بر خطوط انتقال نفت و گاز در کشور

کالر و ایسرمن<sup>۱</sup> [۳] مدلی برای به‌کارگیری سیلندرها استاندارد پنوماتیکی و روش‌های کنترلی شامل حلقه کنترل کننده فشار و موقعیت‌های عملگر و جبران تلفات اصطکاکی سامانه ارائه دادند. سورلی<sup>۲</sup> و همکاران [۴] در عملگر یوک شیاردار با دو سیلندر، به بررسی دینامیکی هوای موجود در سیلندر با فرض پلی‌تروپیک بودن رفتار سیال هوا پرداختند و تغییرات فشار با زمان را هنگام جابجایی پیستون را مطالعه کردند. سخاوت<sup>۳</sup> و همکاران [۵] به بررسی عددی و آزمایشگاهی پایداری سامانه کنترلی عملگر هیدرولیکی بر مبنای سیال روغن از حالت بی‌باری عملگر تا حالت بیشینه گشتاور تولیدی پرداختند تا مدلی را ارائه دهند که از اندازه‌گیری مداوم سرعت و نیرو به منظور کنترل سامانه بی‌نیاز باشد. اوربول<sup>۴</sup> و همکاران [۶] به بررسی عملکرد عملگر به عنوان تابعی از اندازه، پارامترهای طراحی و محدودیت‌های فیزیکی پرداختند. رُنْجی<sup>۵</sup> و همکاران [۷] به فرمول‌بندی و شبیه‌سازی موقعیت مکانی در عملگر یوک شیاردار الکتروهیدرواستاتیکی قابل تنظیم پرداختند. مارتون<sup>۶</sup> و همکاران [۸] مدلی خطی و وابسته به سرعت سیال روغن برای محاسبه تلفات اصطکاکی ارائه دادند. در این مدل، اصطکاک با استفاده از مدل نمایی تعریف و الگوریتم تکرار شونده‌ای برای تعیین پارامترهای مدل اصطکاکی ارائه شده است. محمود و همکاران [۹] به مدل‌سازی و شبیه‌سازی عملگر دیافراگمی پرداختند که در این بررسی، پارامترهای هندسی مختلفی شامل ثابت فنر، ضریب استهلاک و اصطکاک به صورت آزمایشگاهی مطالعه و با نتایج شبیه‌سازی عددی مقایسه گردید. یاوزینگ<sup>۷</sup> و همکاران [۱۰] مدلی ریاضی برای شبیه‌سازی بار هیدرولیکی عملگر ارائه دادند که به طراحان عملگر برای بررسی اثر این پارامتر در طراحی کمک می‌کند. مطالعاتی در مورد بهینه‌سازی پارامترها و روش‌های کنترلی بار هیدرولیکی عملگر توسط این محققان انجام شد. لی<sup>۸</sup> و همکاران [۱۱] به مدل‌سازی و شبیه‌سازی عددی تغییرات دمایی در بخش هیدرولیکی عملگرهای یوک شیاردار الکتروهیدرواستاتیکی پرداختند. این

1- Keller and Isermann

2- Sorli

3- Sekhavat

4- Oriol

5- Rongjie

6- Marton

7- Yaoxing

8- Li

9- Harris

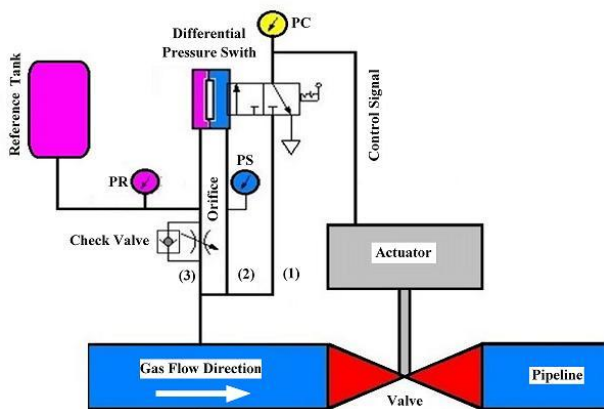
10- Liu

11- Guo

## ۲- هندسه و طراحی آزمایش

فشار سیال گازی از طریق لوله ارتباطی به مجموعه عملگر منتقل شده و به سه شاخه تقسیم می‌گردد. یک مسیر آن به سمت شیر پنوماتیکی نرمال بسته ۳/۲ می‌رود و به دلیل بسته بودن این شیر، سیال پر فشار در مسیر ۱ در حالت انتظار می‌ماند (شکل ۲). مسیر ۳ حاوی سیال پر فشار با عبور از مجموعه‌ای شامل اوریفیس و شیر یک طرفه به دو شاخه تقسیم می‌گردد. یک شاخه از آن به سمت چپ شیر دیافراگمی<sup>۱</sup> و شاخه دیگر این مسیر به سمت مخزن مرجع<sup>۲</sup> می‌رود. فشار مسیرهای (۲) و (۳) به ترتیب PS و PR در هر لحظه از طریق ترانسمیتر فشار<sup>۳</sup> قابل انتقال و ثبت در رایانه می‌باشد.

مخزن مرجع، هنگامی که سیال خط لوله مایع باشد، یک مخزن تحت فشار است که دیافراگمی درون آن قرار دارد و در پشت این دیافراگم، فنی تعبیه شده که فشار سیال سبب جمع شدن فتر گردیده و مخزن از سیال مایع (اغلب، روغن هیدرولیک) پر می‌شود. در هنگام نصب بر روی خطوط لوله انتقال گاز به دلیل قابلیت تراکم‌پذیری سیال گازی، نیازی به تعبیه دیافراگم در مخزن نمی‌باشد.



شکل (۲): شماتیک سامانه تشخیص شکست خط عملگر.

هنگامی که سیال خط لوله مایع است، در مسیر لوله ارتباطی که از خط لوله وارد می‌شود، یک فیلتر جداکننده<sup>۴</sup> قرار داده می‌شود تا از ورود سیال کثیف نفتی به سامانه جلوگیری به عمل آید. فشار سیال نفتی ورودی، موجب حرکت دیسک و

ایران در ادامه به اختصار شرح داده شده است. عملگر ۳۶ اینچ خطوط لوله صادراتی شرکت نفت جنوب در رامهرمز توسط شرکتی در ایالات متحده آمریکا طراحی و ساخته شده است که دانش اعمال تغییرات در سامانه تشخیص شکست خط این عملگر در دست نیست. برای تغییر بر اساس طراحی جدید و تغییرات در خطوط لوله موجود، نیاز به تغییر تنظیمات نرخ افت فشار ناشی از شکست خط بر ۰/۵ بار بر دقیقه احساس شد در حالی که نمودار اختلاف فشار طرفین شیر دیافراگمی بر حسب نرخ افت فشار ناشی از شکست خط لوله برای این عملگر موجود نیست. این مشکل برای اکثر عملگرهای شیرهای خطوط لوله انتقال گاز و نفت وجود دارد. با به دست آوردن نمودار اختلاف فشار طرفین شیر دیافراگمی بر حسب نرخ افت فشار ناشی از شکست خط برای محدوده وسیعی از فشارهای اولیه خط لوله و قطرهای اوریفیس و نرخ‌های افت فشار شکست خط لوله می‌توان این مشکل را مرتفع نمود و از این نمودار به عنوان مبنای طراحی و تنظیم سامانه تشخیص شکست خط عملگرها استفاده نمود. در واقع سامانه تشخیص شکست خط یکی از مهمترین بخش‌های یک عملگر شیر می‌باشد که از خط لوله انتقال مواد با ارزش مراقبت می‌نماید. روزانه نفت و گازی با ارزش میلیون‌ها دلار از خطوط انتقال عبور می‌نماید که عملکرد ناموفق و نادرست عملگرهای شیرهای این خطوط می‌تواند فجایع بزرگی را به بار آورد که متاسفانه تاکنون وقایع متعددی نیز در این زمینه رخ داده است.

بر مبنای بررسی مطالعات انجام شده تاکنون، تمرکز اغلب محققان بر عملگرهای پره‌دوار معطوف بوده است و سایر عملگرها کمتر مورد بررسی قرار گرفته شده است. یکی از دلایل آن، نبودن داده‌های آزمایشگاهی معتبر و مناسب در این زمینه به دلیل هزینه بالای آزمایش‌های مورد نیاز می‌باشد. از دلایل دیگر آن، انحصاری شدن ساخت این نوع عملگرها با سرمایه‌گذاری چند شرکت معتبر در ایتالیا و ایالات متحده آمریکا، طراحی‌های استراتژیک و حساس و نیز نقش پدافندی غیرعامل این نوع از عملگرها است. اندک مطالعات انجام شده در زمینه عملگرهای یوک شیاردار مربوط به کارکرد این نوع عملگرها بر روی خطوط انتقال نفت و در واقع وجود کنترلر هیدرولیکی (سامانه تشخیص شکست خط لوله) می‌باشد. با وجود کاربرد زیاد مجموعه عملگر در خطوط انتقال نفت و گاز، در زمینه عملگرهای یوک شیاردار، داده‌های آزمایشگاهی معتبر و مناسب و نیز شبیه‌سازی عددی وجود ندارد.

- 1- Differential Pressure Switch
- 2- Reference Tank
- 3- Pressure Transmitter
- 4- Filter Separator

شیر دیافراگمی بر حسب زمان برای ثبت داده‌ها در مدت زمان اجرای سه دقیقه هر آزمایش ترسیم می‌گردد.

### جدول (۱): تعداد متغیرهای مطالعه آزمایشگاهی.

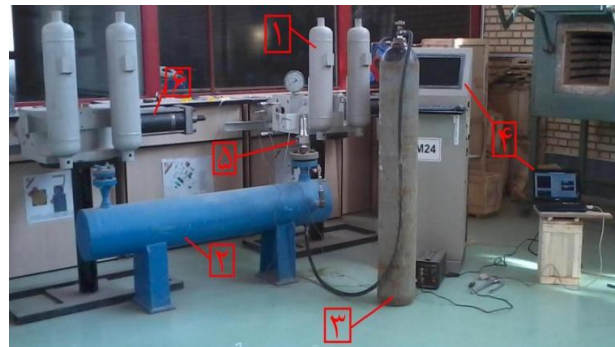
پارامترها	فشار		تعداد
	اولیه خط لوله	نرخ افت فشار شکست خط	
قطر اوریفیس	۳	۹	۳

بستر آزمایشگاهی در شکل ۳ آمده است که شامل؛ (۱) مخازن (دو عدد) روغن عملگر، (۲) شبیه‌ساز خط لوله (مخزن تحت فشار)، (۳) کپسول نیتروژن، (۴) رایانه، (۵) شیر ایمنی و (۶) مجموعه سیلندر و پیستون می‌باشد. به جای سیال گاز پر فشار در خط لوله از نیتروژن فشرده در آزمایش استفاده گردید. در این بستر آزمایشگاهی از یک لوله دو سر بسته به عنوان مخزن تحت فشار به عنوان شبیه‌ساز خط لوله استفاده شده است که توسط یک کپسول نیتروژن به فشار مورد نظر می‌رسد و با یک شیر اطمینان وضعیت حد بالای فشار آن کنترل می‌شود. برای ایجاد افت فشار ناشی از شکست خط به واسطه خروج سیال از مخزن تحت فشار شبیه‌ساز خط لوله، شیری به وسیله لوله‌رابط بر روی آن نصب گردیده است و با تنظیم میزان دبی خروجی سیال نیتروژن موجود در شبیه‌ساز خط لوله با کمک یک شیر مدرج می‌توان افت فشار میانگین مورد نظر را به خط لوله اعمال نمود. فشار مسیره‌های (۲) و (۳) از طریق ترانس‌میتور فشار به رایانه ارسال و ثبت می‌گردد.

### ۳- نتایج آزمایشگاهی و بحث

عملگر در واقع ابزاری اتوماتیک و به طور کامل مکانیکی برای بستن شیرهای ربع گرد در خطوط با ارزش انتقال نفت و گاز به هنگام رخداد پدیده شکست در خطوط لوله می‌باشد. شکست در خط لوله سبب افزایش سرعت گاز و در نتیجه افزایش افت فشار در عبور سیال از شیر می‌شود ولی نمی‌توان از این ویژگی به عنوان سیگنالی برای عملکرد سامانه تشخیص شکست خط لوله استفاده نمود زیرا برای مثال، در مواقعی که شیر به طور کامل باز است، مقدار افت فشار بسیار ناچیز است. اگر یک مخزن مرجع به همراه مجموعه‌ای شامل اوریفیس و شیر یک‌طرفه را به وسیله لوله‌های رابط به خط لوله متصل نماییم، به صورت آنی فشار در مخزن با فشار خط لوله برابر می‌شود اما زمانی که فشار خط لوله به دلیل شکست در آن کاهش یابد، فشار در مخزن مرجع بیشتر از فشار خط لوله خواهد بود. در

فشرده نمودن روغن هیدرولیک در سامانه می‌گردد. اگر شکستی در خط لوله به وقوع پیوندد، سبب ایجاد افت فشار در خط لوله شده و فشار در سمت راست شیر دیافراگمی نیز به دلیل ارتباط مستقیم و بدون واسطه با خط لوله به طور مشابه و همزمان با تغییرات فشار در خط لوله تغییر می‌کند ولی فشار در سمت چپ شیر دیافراگمی باید از مجموعه‌ای شامل اوریفیس و شیر یک‌طرفه عبور نماید و چون شیر یک طرفه اجازه گذر سیال را نمی‌دهد، به اجبار سیال گازی باید از اوریفیس عبور کرده و این موضوع سبب تغییر نرخ افت فشار در طرفین شیر دیافراگمی می‌شود. در نتیجه، اختلاف فشاری در طرفین شیر دیافراگمی ایجاد می‌گردد و با توجه به پایین‌تر بودن فشار در سمت راست دیافراگم، سبب حرکت دیافراگم به سمت راست شده و تغییر وضعیت شیر ۳/۲ پنوماتیکی را به همراه دارد و با باز نمودن مسیر ۱، در واقع سیگنالی را به عملگر می‌فرستد. این سیگنال فشاری به مخزن عملگر وارد شده و سبب اعمال فشار موجود در مسیر ۱ به سیال روغن موجود در مخزن می‌شود. روغن پر فشار به درون سیلندر(ها) وارد شده و سبب حرکت شاتون می‌شود و به دلیل اتصال لغزنده به شاتون، لغزنده در شیار یوک حرکت کرده و دوران یوک و در نتیجه دوران ساقه شیر را به همراه دارد که در نهایت سبب چرخش شیر می‌شود.

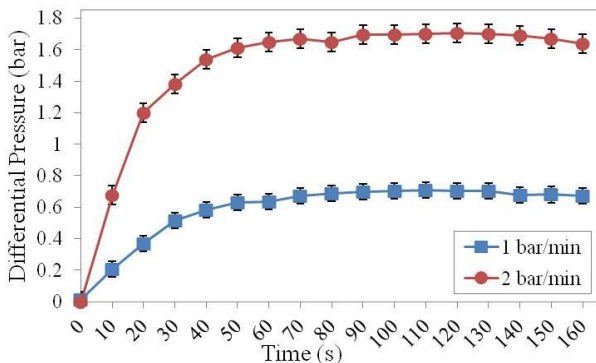


شکل (۳): بستر آزمایشگاهی مورد مطالعه.

با توجه به تعداد متغیرها در جدول ۱، تعداد آزمایش‌ها ۲۷ عدد خواهد بود. پارامتر فشار اولیه خط لوله مقادیر ۳۰، ۶۰ و ۸۵ بار، پارامتر نرخ افت فشار ناشی از شکست خط لوله مقادیر ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۲۵، ۲/۵، ۳، ۳/۵، ۴ و ۴/۵ بار بر دقیقه و پارامتر قطر اوریفیس مقادیر ۱/۶، ۱/۱ و ۱/۴ میلی‌متر را شامل می‌شوند. در هر آزمایش یک ترکیب سه‌گانه متفاوت از پارامترهای قطر اوریفیس، نرخ افت فشار شکست خط و فشار اولیه خط لوله انتخاب می‌گردد و نمودار اختلاف فشار طرفین

با افزایش قطر اوریفیس در سامانه تشخیص شکست خط و ثابت ماندن فشار اولیه خط لوله، هرچه نرخ افت فشار ناشی از شکست خط لوله بیشتر شود، اختلاف فشار طرفین شیر دیافراگمی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، برای یک قطر اوریفیس مشخص، زمان مورد نیاز برای رسیدن به اختلاف فشار بیشینه طرفین شیر دیافراگمی برای تمامی نرخ‌های افت فشار ناشی از شکست خط لوله یکسان بوده و تنها به اندازه قطر اوریفیس در سامانه تشخیص شکست خط وابسته است. در واقع تنها مشخصه موثر در زمان وقوع اختلاف فشار بیشینه، قطر اوریفیس است و مشخصه‌هایی دیگر همچون نرخ افت فشار ناشی از شکست خط لوله و فشار اولیه خط لوله در مقدار این زمان اثری ندارند.

با ثابت بودن قطر اوریفیس و فشار اولیه خط لوله، تنها متغیر مورد بررسی نرخ افت فشار ناشی از شکست خط لوله است. هر چه نرخ افت فشار شکست خط لوله بیشتر باشد، جرم بیشتری از سیال درون خط لوله به اتمسفر تخلیه می‌شود. در لحظه اولیه، قبل از شکست خط لوله، فشار سیال در تمامی نقاط سامانه تشخیص شکست خط برابر با فشار اولیه خط لوله است. در لحظه شکست خط لوله، فشار در سمتی از شیر دیافراگمی که به طور مستقیم به خط لوله متصل است، با نرخ افت فشار ناشی از شکست خط برابر است اما در سمت دیگر شیر دیافراگمی به دلیل عبور سیال از درون اوریفیس، نرخ افت فشار ایجاد شده با نرخ افت فشار ناشی از خط لوله متفاوت است. پس از ایجاد شکست در خط لوله، دبی جرمی سیال خروجی از خط لوله  $\dot{m}_{PL}$  همواره بزرگتر مساوی دبی جرمی سیال خروجی از مخزن مرجع  $\dot{m}_{ACC}$  است  $\dot{m}_{ACC} \leq \dot{m}_{PL}$ .



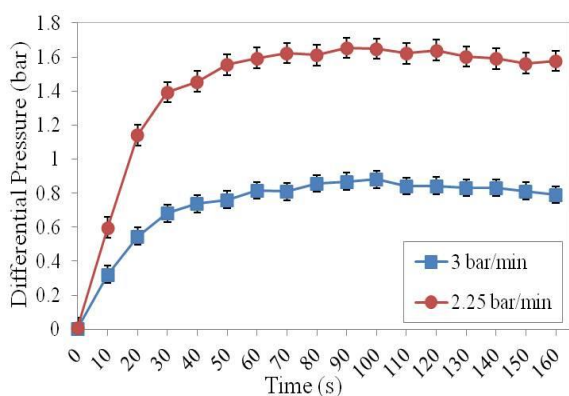
شکل (۴): اختلاف فشار طرفین شیر دیافراگمی بر حسب زمان برای فشار اولیه خط ۳۰ بار و قطر اوریفیس ۰/۶ میلی‌متر.

هنگامی که مخزن به خط لوله متصل می‌گردد، سیال به دلیل افت فشار کمتر، مسیر شیر یک‌طرفه را به جای مسیر اوریفیس‌دار انتخاب می‌کند و وارد مخزن شده تا به فشار خط لوله برسد ولی در هنگام شکست خط لوله، امکان عبور سیال موجود در مخزن انباشتگر از مسیر شیر یک‌طرفه وجود ندارد و تنها سیال از مسیر اوریفیس‌دار عبور خواهد کرد و این موضوع سبب ایجاد یک نرخ افت فشار جدید در مجموعه خواهد شد که از نرخ افت فشار ناشی از شکست در خط لوله کمتر خواهد بود. هرچه نرخ افت فشار در خط لوله بزرگ‌تر و یا قطر اوریفیس کوچک‌تر و یا حجم مخزن مرجع بیشتر باشد، اختلاف بین فشار خط لوله و فشار مخزن مرجع بیشتر خواهد بود. این اختلاف فشار به صورت مکانیکی و مداوم از طریق یک شیر دیافراگمی حس خواهد شد و لحظه‌ای که این اختلاف فشار در طرفین شیر دیافراگمی نیرویی بیشتر از نیروی ناشی از بار اعمالی به فنر تولید نماید، با ورود سیال پر فشار به مخازن روغن عملگر به دلیل تغییر وضعیت شیر ۳/۲، سبب بسته شدن شیر نصبی روی خط لوله گاز می‌گردد. زمانی که فشار در خط لوله کاهش می‌یابد، به دلیل وجود اوریفیس، فشار در مخزن مرجع با یک تاخیر زمانی و نیز نرخ متفاوت کاهش می‌یابد. اختلاف میان این دو فشار با گذر زمان افزایش یافته تا به یک مقدار بیشینه رسیده و پس از آن کاهش می‌یابد که در واقع بیانگر رفتار ذاتی مجموعه اوریفیس در سامانه تشخیص شکست خط عملگر می‌باشد. این اختلاف فشار در طرفین شیر دیافراگمی تابعی از نرخ افت فشار ناشی از شکست خط لوله، قطر اوریفیس و فشار اولیه خط لوله می‌باشد.

نتایج مطالعه آزمایشگاهی، تا سه دقیقه پس از ایجاد افت فشار ناشی از شکست در خط لوله را بررسی می‌نماید. برای قطر اوریفیس‌های ۰/۶، ۱/۱ و ۱/۴ میلی‌متر موجود در سامانه تشخیص شکست خط عملگر شیر ربع‌گرد نصبی بر خط لوله انتقال گاز در مطالعه آزمایشگاهی حاضر، تغییرات اختلاف فشار طرفین شیر دیافراگمی با زمان برای فشار اولیه خط لوله ۳۰ بار در شکل‌های ۶-۴، برای فشار اولیه خط لوله ۶۰ بار در شکل‌های ۹-۷ و برای فشار اولیه خط لوله ۸۵ بار در شکل‌های ۱۲-۱۰ نشان داده شده است. هر عملگر با توجه به فشار اولیه خط لوله‌ای که بر روی آن نصب می‌گردد و قطر اوریفیس انتخابی برای سامانه تشخیص شکست خط آن که در واقع قلب این سامانه است، در محدوده خاصی از نرخ‌های افت فشار ممکن الوقوع در رخداد شکست خط لوله عمل می‌نماید.

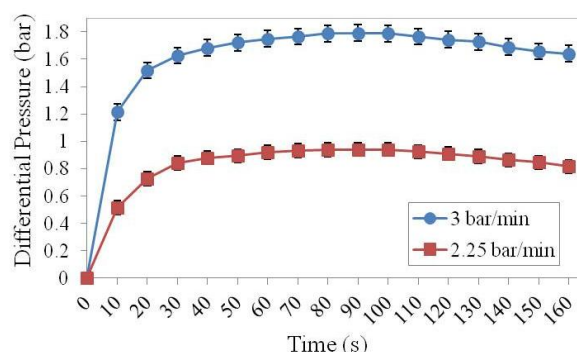
با کاهش قطر اوریفیس و ثابت ماندن نرخ افت فشار ناشی از شکست خط، اختلاف فشار بین مخزن مرجع و خط لوله (اختلاف فشار طرفین شیر دیافراگمی) افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، با کاهش قطر اوریفیس، زمان دستیابی به اختلاف فشار بیشینه طرفین شیر دیافراگمی نیز افزایش می‌یابد، بطوریکه مطابق با نتایج آزمایشگاهی برای قطر اوریفیس ۰/۶ میلی‌متری زمان وقوع اختلاف فشار بیشینه در طرفین شیر دیافراگمی ۵۰ ثانیه، برای قطر اوریفیس ۱/۱ میلی‌متری این زمان ۹۵ ثانیه و برای قطر اوریفیس ۱/۴ میلی‌متری ۱۲۰ ثانیه است.

با ثابت بودن نرخ افت فشار ناشی از شکست خط لوله و نیز فشار اولیه خط لوله، تنها متغیر مورد بررسی قطر اوریفیس موجود در سامانه تشخیص شکست خط است. هر چه قطر اوریفیس بزرگ‌تر باشد، جرم بیشتری از سیال درون مخزن مرجع تخلیه می‌شود. قبل از شکست خط لوله در لحظه اولیه، فشار سیال در تمامی نقاط سامانه تشخیص شکست خط برابر با فشار اولیه خط لوله است. در لحظه شکست خط لوله، فشار در سمتی از شیر دیافراگمی که به طور مستقیم به خط لوله متصل است، با نرخ افت فشار ناشی از شکست خط برابر است اما در سمت دیگر شیر دیافراگمی به دلیل عبور سیال از درون اوریفیس، نرخ افت فشار ایجاد شده با نرخ افت فشار ناشی از خط لوله متفاوت است

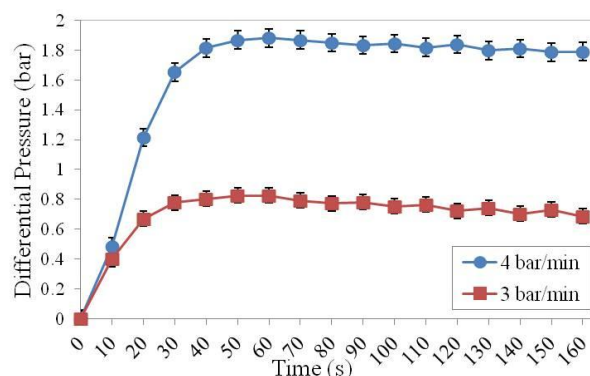


شکل (۸): اختلاف فشار طرفین شیر دیافراگمی بر حسب زمان برای فشار اولیه خط ۶۰ بار و قطر اوریفیس ۱/۴ میلی‌متر.

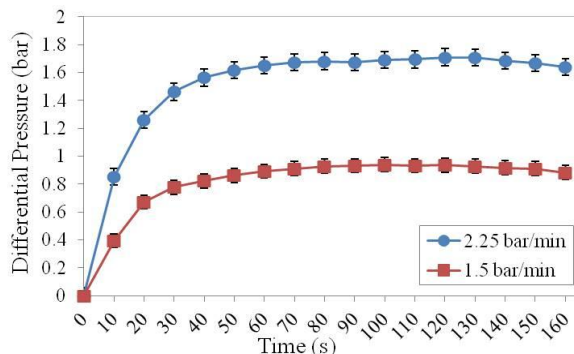
هر چه نرخ افت فشار شکست خط بیشتر باشد، دبی جرمی خروجی سیال از خط لوله بیشتر است که در واقع تفاوت مقدارهای  $\dot{m}_{PL}$  و  $\dot{m}_{ACC}$  بیشتر می‌شود و در نتیجه، اختلاف فشار بیشتری بین طرفین دیافراگم ایجاد می‌شود. این اختلاف فشار تا یک مقدار بیشینه افزایش می‌یابد و پس از آن به دلیل کاهش جرم سیال در مخزن مرجع، فشار مخزن کاهش یافته و به فشار خط نزدیک می‌گردد.



شکل (۵): اختلاف فشار طرفین شیر دیافراگمی بر حسب زمان برای فشار اولیه خط ۳۰ بار و قطر اوریفیس ۱/۴ میلی‌متر.

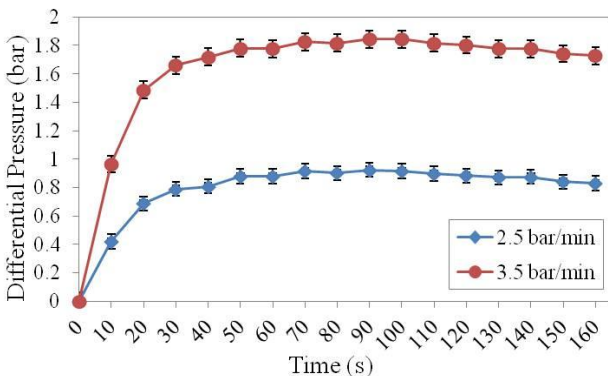


شکل (۶): اختلاف فشار طرفین شیر دیافراگمی بر حسب زمان برای فشار اولیه خط ۳۰ بار و قطر اوریفیس ۱/۴ میلی‌متر.

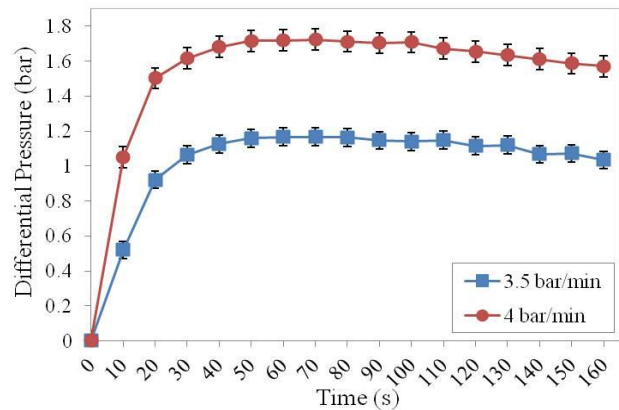


شکل (۷): اختلاف فشار طرفین شیر دیافراگمی بر حسب زمان برای فشار اولیه خط ۶۰ بار و قطر اوریفیس ۰/۶ میلی‌متر.

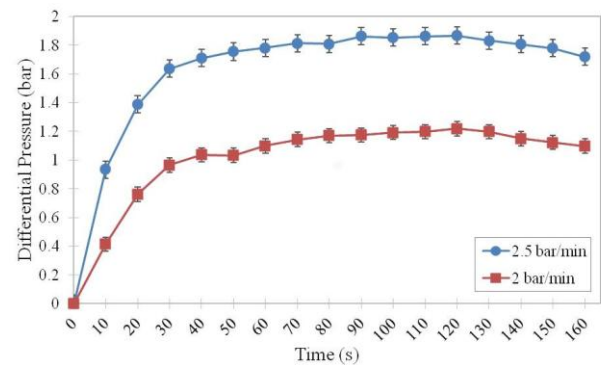
مورد بررسی فشار اولیه خط لوله است و هر چه فشار اولیه خط لوله بیشتر باشد، برخورد مولکول‌های سیال با یکدیگر بیشتر بوده و نیروی بیشتری به یکدیگر وارد می‌نمایند. در لحظه اولیه، قبل از شکست خط لوله، فشار سیال در تمامی نقاط سامانه تشخیص شکست خط برابر با فشار اولیه خط لوله است. در لحظه شکست خط لوله، فشار در سمتی از شیر دیافراگمی که به طور مستقیم به خط لوله متصل است، با نرخ افت فشار شکست خط برابر است اما در سمت دیگر شیر دیافراگمی به دلیل عبور سیال از درون اوریفیس، نرخ افت فشار ایجاد شده با نرخ افت فشار شکست خط لوله متفاوت است. با رخداد شکست در خط لوله، دبی جرمی سیال خروجی از خط لوله  $\dot{m}_{PL}$  همواره بزرگتر مساوی دبی جرمی سیال خروجی از مخزن مرجع  $\dot{m}_{ACC}$  است  $\dot{m}_{ACC} \leq \dot{m}_{PL}$ . هر چه فشار اولیه خط لوله بیشتر باشد، دبی جرمی سیال خروجی از مخزن مرجع از طریق اوریفیس بیشتر است که در واقع مقدار  $\dot{m}_{ACC}$  به مقدار  $\dot{m}_{PL}$  نزدیک‌تر است و در نتیجه، اختلاف فشار کمتری در طرفین دیافراگم ایجاد می‌شود. این اختلاف فشار تا یک مقدار بیشینه افزایش می‌یابد و پس از آن به دلیل کاهش جرم سیال در مخزن مرجع، فشار مخزن کاهش یافته و به فشار خط نزدیک می‌گردد. یا می‌توان از این دیدگاه بررسی کرد که، هر چه فشار اولیه خط لوله بیشتر باشد، سرعت خروجی سیال از مخزن انباشتگر از طریق اوریفیس بیشتر است و در نتیجه افت فشار موضعی بیشتر در اوریفیس بیشتر بوده و نرخ افت فشار در مسیر گذر از اوریفیس به نرخ افت فشار ناشی از شکست خط نزدیک‌تر است. به همین دلیل برای فشارهای اولیه خط لوله بزرگ‌تر، اختلاف فشار طرفین شیر دیافراگمی مقدار کمتری است.



شکل (۱۱): اختلاف فشار طرفین شیر دیافراگمی بر حسب زمان برای فشار اولیه خط ۸۵ بار و قطر اوریفیس ۱/۱ میلی‌متر.



شکل (۹): اختلاف فشار طرفین شیر دیافراگمی بر حسب زمان برای فشار اولیه خط ۶۰ بار و قطر اوریفیس ۱/۴ میلی‌متر.

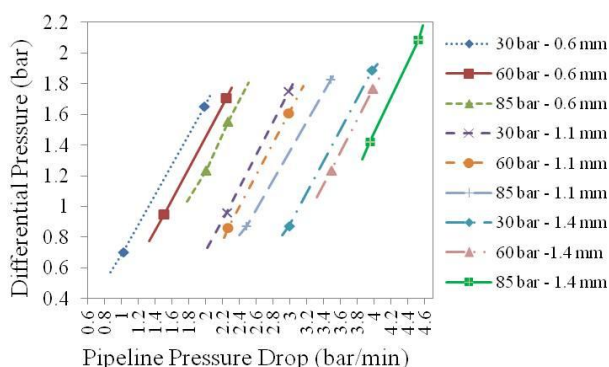


شکل (۱۰): اختلاف فشار طرفین شیر دیافراگمی بر حسب زمان برای فشار اولیه خط ۸۵ بار و قطر اوریفیس ۰/۶ میلی‌متر.

پس از ایجاد شکست در خط لوله، دبی جرمی سیال خروجی از خط لوله  $\dot{m}_{ACC}$  همواره بزرگتر مساوی دبی جرمی سیال خروجی از مخزن مرجع  $\dot{m}_{ACC}$  است  $\dot{m}_{ACC} \leq \dot{m}_{PL}$ . هر چه قطر اوریفیس بزرگ‌تر باشد، دبی جرمی سیال خروجی از مخزن مرجع به واسطه اوریفیس بیشتر است که در واقع مقدار  $\dot{m}_{ACC}$  به مقدار  $\dot{m}_{PL}$  نزدیک‌تر است و در نتیجه، اختلاف فشار کمتری در طرفین دیافراگم ایجاد می‌شود. این اختلاف فشار تا یک مقدار بیشینه افزایش می‌یابد و پس از آن به دلیل کاهش جرم سیال در مخزن مرجع، فشار مخزن کاهش یافته و به فشار خط نزدیک می‌گردد. برای نرخ ثابت افت فشار شکست خط لوله، اختلاف فشار بین مخزن مرجع و خط لوله با کاهش فشار اولیه خط لوله، افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، منحنی‌ها نشان می‌دهند که برای نرخ افت فشارهای مختلف، زمان دستیابی به اختلاف فشار بیشینه در طرفین شیر دیافراگمی یکسان است و تنها به اندازه قطر اوریفیس بستگی دارد. با ثابت بودن قطر اوریفیس و نرخ افت فشار ناشی از شکست خط، تنها متغیر



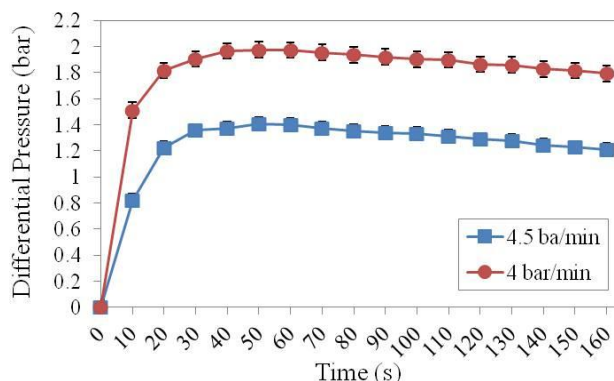
کاری خط لوله مشخص شوند، می توان قطر اوریفیس را به کمک شکل ۱۳ معین نمود. نرخ افت فشار منتخب را روی محور افقی مشخص کرده و از این نقطه خطی عمودی خارج می کنیم تا منحنی مربوط به فشار کاری مربوط به خط لوله را در بزرگ ترین اختلاف فشار ممکن در مجموعه منحنی های ارائه شده، قطع نماید. از نقطه به دست آمده از تقاطع خط عمودی و منحنی، یک خط افقی رسم کرده تا محور عمودی را قطع نماید. مقدار مشخص شده برای پارامتر اختلاف فشار بیشه روی محور عمودی در واقع مقدار تنظیمی برای شیر دیافراگمی خواهد بود که مقدار در محدوده ۰/۲ تا ۲ بار خواهد بود. در عمل، مقدار پیشنهادی تنظیم شیر دیافراگمی برای پیشگیری از به وجود آمدن تداخل، ۹۰ درصد مقدار تعیین شده مطابق با روش بالا است. در عمل باید برای یک قطر اوریفیس مشخص، شیر دیافراگمی را بر اساس مقدار اختلاف فشار در شکل ۱۳ تنظیم نمود.



شکل (۱۳): اختلاف فشار طرفین شیر دیافراگمی بر حسب نرخ افت فشار شکست خط با فشار اولیه خط و قطر اوریفیس مختلف.

#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله، اثر مشخصه های قطر اوریفیس در سامانه تشخیص شکست خط، فشار اولیه خط لوله و نرخ افت فشار ناشی از شکست خط لوله بر اختلاف فشار طرفین شیر دیافراگمی در عملگر ربع گرد یوک شیاردار با سیال عبوری گاز (نیتروژن) به صورت آزمایشگاهی بررسی شد. هر چه نرخ افت فشار ناشی از شکست خط لوله بیشتر شود، اختلاف فشار طرفین شیر دیافراگمی افزایش می یابد. با ثابت ماندن نرخ افت فشار ناشی از شکست خط لوله و کاهش قطر اوریفیس، اختلاف



شکل (۱۲): اختلاف فشار طرفین شیر دیافراگمی بر حسب زمان برای فشار اولیه خط ۸۵ بار و قطر اوریفیس ۱/۴ میلیمتر.

هر قطر اوریفیسی برای یک محدوده خاص از فشار اولیه خط و نرخ افت فشار ناشی از شکست خط کاربرد دارد و نمی توان از هر قطر اوریفیس دلخواهی برای شرایط کاری ویژه آن خط لوله و افت فشارهای طبیعی و ناشی از شکست اعمالی به آن خط استفاده نمود. برای مثال اگر قطر اوریفیس انتخابی به صورتی باشد که نرخ دبی جرمی خروجی از آن با نرخ دبی جرمی خروجی از خط لوله برابر باشد، سامانه تشخیص شکست خط هرگز متوجه ایجاد شکست در خط لوله نخواهد شد.

شکل ۱۳، اختلاف فشار بیشه بین فشار خط لوله و مخزن مرجع را بر حسب نرخ افت فشار میانگین ناشی از شکست خط لوله به عنوان تابعی از قطر اوریفیس و فشار اولیه خط لوله نمایش می دهد. برای تنظیم سامانه تشخیص شکست خط، لازم است تا از شرایط کاری خط لوله اطلاعات کامل به دست آید که این پارامترها مواردی از قبیل؛ محدوده فشار کاری گاز، مقدار اندازه گیری شده افت فشار کمینه خط (در زمان کارکرد عادی و در محل نصب شیر برای کمینه، نرمال و بیشه افت فشار فشارهای کاری خط لوله) و مقدار اندازه گیری شده افت فشار بیشه خط (در زمان کارکرد عادی و در محل نصب شیر برای کمینه، نرمال و بیشه فشارهای کاری خط لوله) می باشند. نرخ افت فشار در شرایط کارکردی نرمال همواره از نرخ افت فشار در زمان شکست خط لوله در فشار کاری یکسان، کمتر است.

برای تنظیم سامانه تشخیص شکست خط لوله لازم است تا نرخ افت فشار بالاتری را نسبت به نرخ افت فشار ممکن الوقوع در زمان شرایط کارکرد عادی سامانه و پایین تر از تمامی نرخ افت فشارهای ممکن الوقوع در زمان شکست خط لوله انتخاب شود. زمانی که نرخ افت فشار ناشی از شکست خط لوله و فشار

- Actuator”, Control Eng. Practice, Vol. 1, No. 3, pp. 505-511, 1993.
4. Sorli, M., Gastaldi, L., Codina, E., and Heras, S. “Dynamic Analysis of Pneumatic Actuators”, Simulation Practice and Theory, No. 7, pp.58-602, 1999.
  5. Sekhavat, P., Sepehri, N., and Wu, Q. “Impact Stabilizing Controller for Hydraulic Actuators with Friction: Theory and Experiments”, Control Engineering Practice, Vol. 14, pp. 1423-1433, 2006.
  6. Oriol, G.B., Campanile, F., Galceran, S.A., Montesinos, D.M. and Rull, J.D. “Hydraulic Actuator Modeling for Optimization of Mechatronic and Adaptronic Systems”, Mechatronics, Vol. 18, No. 10, pp. 634-640, 2008.
  7. Rongjie, K., Zongxia, J., Shaoping, W., and Lisha, C. “Design and Simulation of Electro-hydrostatic Actuator with a Built-in Power Regulator”, Chinese Journal of Aeronautics, Vol. 22, pp. 700-706, 2009.
  8. Márton, S., Fodor, S., and Sepehri, N. “A Practical Method for Friction Identification in Hydraulic Actuators”, Mechatronics, Vol. 21, pp. 350-356, 2011.
  9. Mehmood. A., Laghrouche, S., and Bagdouri, M. “Modeling Identification and Simulation of Pneumatic Actuator for VGT System”, Sensors and Actuators A, Vol. 165, pp. 367-378, 2011.
  10. Yaoxing, S., Hang, Y., Zongxia, J. and Nan, Y. “Matching Design of Hydraulic Load Simulator with Aircraft Actuator”, Chinese Journal of Aeronautics, Vol. 26, No. 2, pp. 470-480, 2013.
  11. Li, K., Zhong, L., Lu, K., and Ping, Y. “Thermal-Hydraulic Modeling and Simulation of the Hydraulic System, Based on the Electro-Hydrostatic Actuator”, Procedia Engineering, Vol. 80, pp. 272 – 281, 2014.
  12. Harris, P., Nolan, S., Garet E., and Donnell, O., “Energy Optimisation of Pneumatic Actuator Systems in Manufacturing”, Journal of Cleaner Production, Vol. 72, pp. 35-45, 2014.
  13. Liu, B., Hou, Y., Li, D., and Yang, J. “A Thermal Bubble Micro-Actuator with Induction Heating”, Sensors and Actuators A, Vol. 2, No. 2, pp. 8-14, 2015.
  14. Guo, K., Wei, J., Fang, J., Feng, R., and Xiaochen, W. “Position Tracking Control of Electro-Hydraulic Single-Rod Actuator, Based on an Extended Disturbance Observer”, Mechatronics, Vol. 27, pp. 47-56, 2015.

فشار بین مخزن مرجع و خط لوله که برابر با اختلاف فشار طرفین شیر دیافراگمی است، افزایش می‌یابد و از سوی دیگر سبب افزایش زمان دستیابی به بیشینه مقدار این اختلاف فشار می‌شود. برای نرخ افت فشارهای ناشی از شکست خط و قطر اوریفیس‌های ثابت، اختلاف فشار طرفین شیر دیافراگمی با کاهش فشار اولیه خط لوله افزایش می‌یابد. زمان دستیابی به اختلاف فشار بیشینه برای مقادیر مختلفی از نرخ‌های افت فشار شکست خط لوله و فشارهای اولیه خط لوله، یکسان است و تنها به اندازه قطر اوریفیس بستگی دارد. دیانگرام با ارزش اختلاف فشار بیشینه بر حسب نرخ افت فشار شکست خط برای مقادیر مختلف فشارهای اولیه خط لوله و قطرهای اوریفیس متفاوت ارائه شده است که مبنای طراحی و تنظیم پرکاربردترین نوع عملگرهای تمام مکانیکی مورد استفاده در خطوط انتقال گاز است. فتر شیر  $3/2$  که در واقع ورود روغن پر فشار به مخازن تحت فشار عملگر و در نتیجه حرکت خطی پیستون و چرخش شیر را سبب می‌گردد، بر مبنای اختلاف فشار بیشینه از شکل ۱۳ به همراه یک ضریب اطمینان انتخاب و تنظیم خواهد شد. هر قطر اوریفیس برای یک فشار اولیه خط لوله مشخص در سامانه تشخیص شکست خط قادر است، یک محدوده خاصی از نرخ‌های افت فشار ناشی از شکست خط را حس نماید و برای نرخ‌های خارج از این محدوده، سامانه تشخیص شکست خط عکس عملی نشان نمی‌دهد.

#### ۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله بر خود لازم می‌دانند از مدیریت پژوهش و فناوری شرکت ملی گاز ایران و مدیریت عامل محترم شرکت دانش بنیان فرا توسعه کیاسا به دلیل حمایت‌هایشان سپاسگزاری نمایند.

#### ۶- مراجع

1. Nesbitt, B. “Handbook of Valves and Actuators: Valve and Actuators Selection”, Chapter 19, Butterworth-Heinemann, pp.425-432, UK, 2011.
2. Zhang, P. “Advanced Industrial Control Technology: A Handbook for Engineers and Researchers, Sensors and Actuators for Industrial Control, Chapter 1”, pp.2-186, Elsevier, UK, 2010.
3. Keller, H., and Isermann, R. “Model-Based Nonlinear Adaptive Control of a Pneumatic