

بررسی آزمایشگاهی الگوی تغییرات فشار گذرا در طول مجرای افقی حاوی جریان دوفازی لخته‌ای آب و هوا

عبدالرضا کبیری سامانی^۳

سید محمود برقی^۲

امین ایپه‌وند کوهزادی^۱

(دریافت ۹۰/۵/۳۰ پذیرش ۹۱/۳/۱۰)

چکیده

وجود هوا در جریان آب، باعث تغییر در فشارهای ایجاد شده ناشی از جریان گذرای ضربه قوچ در مجرای انتقال آب می‌شود. تحلیل جریان‌های گذرا معمولاً با فرض عدم وجود هوا در سیال انجام می‌شود، اما هوا از منابع مختلف مانند اتصالات، تجهیزات مکانیکی و یا هوای محبوس در خط لوله وارد مجرا می‌شود. این مقاله، نتایج تحقیق آزمایشگاهی در مورد جریان گذرای ناشی از بستن ناگهانی مجرا توسط دریچه در یک تونل مستطیلی افقی حاوی جریان دوفازی لخته‌ای را ارائه می‌دهد. در این پژوهش تغییرات بیشینه فشار گذرا در طول مجرا بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که در ۱۰ درصد طول انتهایی مجرا از موقعیت نصب دریچه به سمت بالادست، به دلیل کاهش سرعت موج فشار ناشی از ضربه قوچ، فشارهایی با فرکانس زیاد و پیک‌های بالا ایجاد می‌شود. در حالی که بقیه طول مجرا به دلیل میرا شدن فشار توسط حبابهای هوا، الگوی متفاوتی از فشار را تجربه می‌کند. همچنین در انتهای مجرا با افزایش دبی هوا نسبت به دبی آب، بیشینه فشارهای ایجاد شده افزایش می‌یابد. این در حالی است که در بالادست مجرا، فشار گذرا با افزایش دبی هوا در مجرا کاهش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: جریان‌های گذرای دوفازی، جریان لخته‌ای، فشار گذرا، مجرا مستطیلی، مدل‌سازی آزمایشگاهی

An Experimental Study on Transient Pressure Changes in a Horizontal Two-Phase Slug Flow

Amin Eyhavand-Koozhadi¹

Seyyed Mahmood Borghei²

Abdorrezza Kabiri-Samani³

(Received Aug. 21, 2011)

Accepted May 30, 2012)

Abstract

Transient flow in a conduit is an unsteady flow, followed by the change in the flow rate. Transient flow analysis is commonly based on the assumption of no air entrainment in the liquid phase. However, air entrainment in the liquid flow frequently occurs in the pipelines. Experimental study has been carried out to investigate the characteristics of transient pressure in a two-phase, air-water slug flow inside a rectangular, horizontal pipeline. Pressure surges propagating the pipeline that results transient pressure changes have been studied by rapidly closing a sluice gate inside the pipeline. The pressure variations have been recorded by installing different pressure transducers to the pipe. The results showed that increasing the air/water discharge ratio affects the transient pressure distribution in pipeline significantly. In the downstream 10% of pipeline length, pressure variation is considerably sharp, fast damping, and with higher peak. In other sections of conduit, low-frequency pressure changes were observed which were damped slowly.

Keywords: Two-Phase Flow, Slug Flow, Transient Pressure, Rectangular Pipeline, Model Experimentation.

1. Grad. M.Sc. Student of Civil Eng., Sharif University of Technology, Tehran

2. Prof. of Civil Eng., Sharif University of Tech., Tehran

3. Assoc. Prof. of Civil Eng., Isfahan University of Technology, Isfahan (Corresponding Author) (+98 311) 3913829 akabiri@cc.iut.ac.ir

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۲- استاد دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

۳- دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان (نویسنده مسئول) ۳۹۱۳۸۲۹ (۰۳۱۱) akabiri@cc.iut.ac.ir

توسط وایتمن^{۱۲} و پیرسال^{۱۳} در سالهای ۱۹۵۹ تا ۱۹۶۲ بررسی شد. این دانشمندان با استفاده از یک مدل آزمایشگاهی نتیجه گرفتند که حتی وجود میزان کمی هوا در جریان می تواند اثرات قابل توجهی بر میزان فشار در جریان های گذرا ایجاد کند [۸]. جانسون^{۱۴} تغییرات فشار ناشی از قطع ناگهانی پمپ در یک خط لوله که هوا و آب تحت رژیم نامشخص در آن جریان داشت را بررسی کرده و اعلام نموده است که به دلیل وجود هوا در جریان، فشارهایی به اندازه سه تا چهار برابر فشار اولیه در مجرا ایجاد شده است [۹]. پنت^{۱۵} و مارتین^{۱۶} در یک بررسی آزمایشگاهی، تغییرات فشار در اطراف یک شیر کنترل جریان به قطر پنج سانتی متر که جریان آب و بخار از آن عبور می کرد و در مدت ۰/۰۴ ثانیه بسته می شد را اندازه گیری و گزارش کردند که بیشینه فشار گذرای ایجاد شده حدود ۲۹ مگاپاسکال بوده است، در حالی که فشار اولیه در حدود ۱۲ مگاپاسکال در دستگاه آزمایش ثبت شده بود [۱۰]. ژو و همکاران^{۱۷} در یک مدل آزمایشگاهی و عددی تغییرات فشار در یک مجرای آب که تحت تأثیر پرشدن ناگهانی قرار داشت را بررسی کرده اند. آنان بیان کرده اند که وجود هوا در جلوی موج آب ایجاد شده در مجرا می تواند الگوهای متفاوتی برای تغییرات فشار ایجاد کند که بستگی به میزان خروج هوا از اریفیس نصب شده در انتهای مجرای آزمایشگاهی دارد. همچنین بیشترین فشار ثبت شده توسط این محققان حدود ۱۵ برابر هد آب بالادست بوده است [۱۱]. استوانوویچ^{۱۸} به بررسی جریان بخار آب در یک نیروگاه پرداخته و تغییرات فشار ناشی از بسته شدن یک شیر در زمان ۰/۲ ثانیه را گزارش داده است. وی بیان کرد در محل شیر، بیشینه فشار حدود ۲۵ برابر فشار اولیه است [۱۲]. استفاده از مدل سازی عددی در بررسی ضربه قوچ در جریان های دو فازي توسط محققان مختلفی مانند جایت^{۱۹} و همسرلی و همکاران^{۲۰} انجام شده است [۱۳ و ۱۴].

در این تحقیق، نقش وجود هوا در تغییرات فشار گذرا ناشی از بسته شدن سریع دریچه به وسیله مقایسه با حالت جریان تک فازي (آب) بررسی شد. همچنین میزان بیشینه فشار ایجاد شده در مجرا، تغییرات فشار در طول مجرا و زمان میرا شدن فشار گذرا مورد مطالعه قرار گرفت. بررسی مطالعات پیشین نشان می دهد اکثر

عبور همزمان دو سیال با ویژگی های متفاوت نظیر آب و هوا، در یک مجرای بسته را جریان دوفازی می نامند. یکی از رایج ترین دسته بندی های جریان دوفازی، تقسیم بندی آنها بر اساس شکل ظاهری جریان است. برای مثال الگوهای ایجاد شده در جریان دوفازی آب و هوا در یک لوله افقی عبارت اند از: جریان حبابی^۱، جریان قالبی یا توپی^۲، جریان لایه ای^۳، جریان موجی^۴، جریان لخته ای^۵، جریان حلقوی^۶ و جریان قطره ای^۷ [۱]. جریان لخته ای وقتی شکل می گیرد که حبابهای بزرگ هوا به وسیله لخته های مایع از یکدیگر جدا شده باشند [۲]. شکل ۱ تصویری از یک واحد لخته را در یک جریان لخته ای توسعه یافته در لوله افقی نشان می دهد.



شکل ۱- تصویر یک واحد لخته در جریان دوفازی لخته ای توسعه یافته در لوله افقی [۱]

جریان گذرا^۸، نوعی جریان غیردائمی^۹ سریع است که در پی ایجاد تغییر ناگهانی در سرعت سیال پدید می آید. این نوع جریان منجر به توزیع فشارهای ضربه ای^{۱۰} بسیار بزرگی در طول لوله شده و عملکرد سیستم را به شدت مختل می کند [۳]. در سال ۲۰۰۷ بر اثر انفجار یک لوله ۲۴ اینچی حامل بخار در محله منهتن^{۱۱} در نیویورک آمریکا به دلیل ایجاد فشارهای شدید گذرا، یک نفر کشته و ۲۵ نفر دیگر زخمی یا دچار سوختگی های شدید شدند [۴]. این تنها نمونه ای از اتفاقاتی است که بر اثر ایجاد این نوع فشارها به وقوع پیوسته است [۵، ۶ و ۷]. بنابراین ملاحظات دقیقی برای طراحی خطوط لوله به منظور تحمل این فشارهای ناگهانی و شدید لازم است. بررسی تأثیر وجود هوا در تغییرات فشار در جریان های گذرا به عنوان موضوعی مهم و قابل توجه برای تحقیق از اواسط قرن بیستم مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. تأثیر وجود هوا در جریان های غیردائمی در سیستم های پمپاژ برای اولین بار

12 Whiteman

13 Pearsall

14 Jonsson

15 Panet

16 Martin

17 Zhou et al.

18 Stevanovic

19 Giot

20 Hammersley et al.

1 Bubbly Flow

2 Plug Flow

3 Stratified Flow

4 Wavy Flow

5 Slug Flow

6 Annular Flow

7 Drop Flow

8 Transient Flow

9 Unsteady Flow

10 Surge Pressure

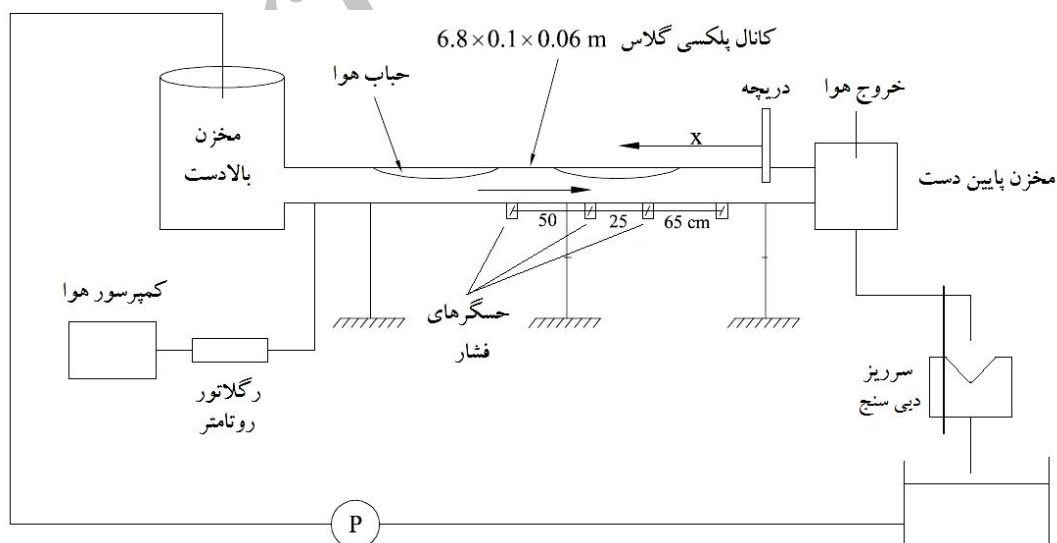
11 Manhattan

دبی آب وارد می‌شد. درون مخزن اندازه‌گیری دبی آب نیز دو ردیف صفحه مشبک آرام کننده بود که تلاطم آب ورودی را کم کرده و آن را به سمت یک سرریز مثلثی ۹۰ درجه برای اندازه‌گیری دبی هدایت می‌نمود. هوا توسط کمپرسور تأمین و از بالادست وارد لوله شده و دبی آن توسط دبی سنج با دقت یک لیتر بر دقیقه اندازه‌گیری می‌شد. در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از انتهای لوله در پیچه مستطیلی شکل قرار داشت که توسط دو عدد فنر بسته می‌شد. اطراف این در پیچه توسط نوارهای لاستیکی آب‌بند شده بود تا مانع از نشت آب در زمان بسته بودن در پیچه و افت در فشارهای وارده شود. با بستن سریع این در پیچه در مدت زمان تقریبی ۶۰ میلی‌ثانیه پدیده ضربه قوچ اتفاق می‌افتد. برای بررسی تغییرات فشار در زمان بسته شدن ناگهانی در پیچه، از چهار عدد حسگر فشار دینامیکی با فرکانس بالا (۱۰۰۰ هرتز) و با دقت ۰/۲۵ درصد استفاده شد که در فواصل مختلف و در کف لوله مطابق شکل ۲ نصب شدند. حسگرها به سیستم برداشت کننده، یک کارت اطلاعات مدل UP601-L که بر روی برد اصلی کامپیوتر نصب شده، وصل شدند. این کارت، اطلاعات را به یک کامپیوتر مجهز به نرم‌افزار مربوطه برای برداشت اطلاعات منتقل می‌نمود. به‌منظور واسنجی حسگرها از ستون آب با ارتفاع ثابت و نیز از فشار هوا استفاده شد، به این ترتیب که از فشار صفر تا فشار حداکثر قابل تحمل برای هر سنسور، حداقل شش فشار انتخاب و به آن اعمال گردید. خروجی سنسور از روی دستگاه در مقابل فشار وارده، یک خط مستقیم با دقت تقریبی ۰/۱ درصد بوده که از آن برای تبدیل خروجی هر سنسور به فشار استفاده شد. شکل ۲ اجزای مدل آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

تحقیقات انجام شده در جریان‌های گذرای دوفازی مربوط به سیستم‌های انتقال بخار و آب در نیروگاهها است. الگوهای جریان دوفازی در این سیستم‌ها معمولاً به صورت لایه‌ای یا قطره‌ای است که در سازه‌های هیدرولیکی کمتر دیده می‌شود. جریان لخته‌ای یکی از الگوهای محتمل در تونل‌های انتقال آب است و بررسی تغییرات فشار گذرا در این رژیم جریان ضروری به نظر می‌رسد.

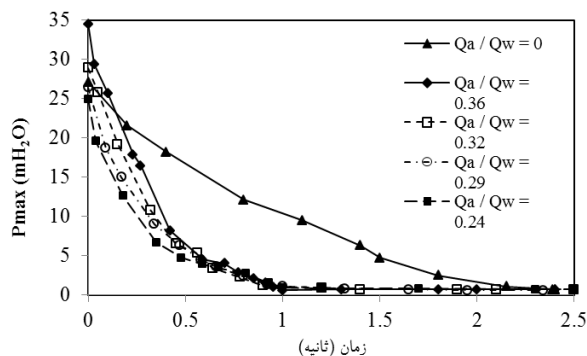
۲- مدل‌سازی آزمایشگاهی

دستگاه مورد استفاده در این تحقیق که در شکل ۲ به صورت شماتیک نمایش داده شده است، یک مجرای افقی از جنس پلکسی گلاس شفاف به طول ۶/۸۰ متر بود که مقطع آن مستطیلی به ابعاد داخلی شش در ده سانتی‌متر و ضخامت یک سانتی‌متر بود. مخزن بالادست، یک مخزن استوانه‌ای به ارتفاع ۱۱۰ سانتی‌متر و قطر ۱۰۰ سانتی‌متر بود که در داخل آن دو ردیف صفحات مشبک آرام کننده نصب شد تا آب ورودی به مخزن آرامش یافته و بدون وجود تأثیرات اضافی ناشی از پمپ شدن آب، وارد مجرای اصلی شود. در طول لوله پایه‌های پیژومتریک به کف لوله متصل شد تا با استفاده از این پایه‌ها و اتصال آنها به حسگرهای اندازه‌گیری فشار بتوان فشارهای وارد بر کف لوله را در هنگام وقوع جریان گذرا اندازه‌گیری کرد. در انتهای مجرا، یک مخزن مکعب مستطیلی شکل از جنس پلکسی گلاس شفاف به‌منظور جداسازی آب و هوا تعبیه شد. در بالا و پایین مخزن، چهار عدد شیر پنج سانتی‌متری نصب شد که از دو شیر بالا هوا و از دو شیر پایین آب خارج می‌شد و از شیرهای پایین مخزن برای کنترل دبی آب در مجرا استفاده می‌شد. آب از شیرهای پایین مخزن توسط دو شلنگ به مخزن اندازه‌گیری

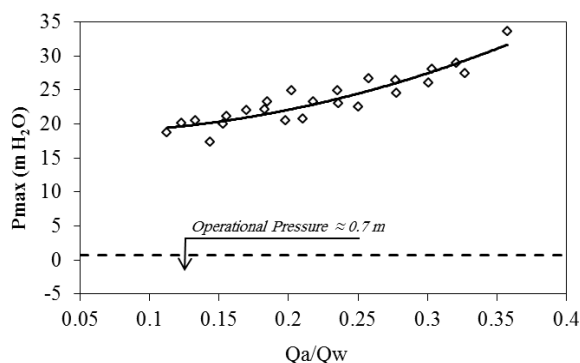


شکل ۲- اجزای مدل آزمایشگاهی

۳- نتایج

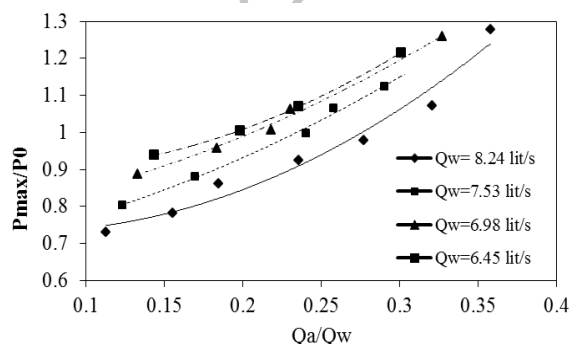


شکل ۳- تغییرات فشار گذرای دوفازی و تک-فازی در مقابل زمان در مجاورت دریچه



شکل ۴- تغییرات فشار بیشینه گذرای دوفازی با نسبت دبی هوا به آب در مجاورت دریچه

دبی هوا به آب نشان می‌دهد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد هرگاه نسبت دبی هوا به آب بین $0/2$ تا $0/3$ باشد، فشار گذرای دوفازی از حالت تک فازی بیشتر می‌شود و این افزایش فشار در جریان لخته‌ای می‌تواند تا $1/27$ برابر فشار گذرای تک فازی نیز بالا رود. این مسئله باید در طراحی خطوط لوله انتقال که در معرض این رژیم جریان دوفازی هستند، مد نظر قرار گیرد. علاوه بر نقش هوا در میرا کردن امواج فشاری ضربه قوچ، وجود حبابهای هوا در مسیر جریان باعث می‌شوند فشارهای گذرا در طول مجرا کاهش یابند.



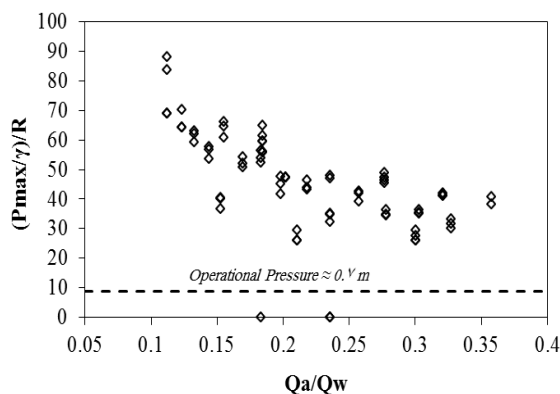
شکل ۵- تغییرات نسبت فشار گذرای دوفازی به تک فازی در مقابل نسبت دبی هوا به آب در مجاورت دریچه

شکل ۳ تغییرات فشار گذرا با زمان را برای جریان تک‌فازی و دوفازی در مجاورت دریچه نشان می‌دهد. در این شکل Q_w و Q_a به ترتیب دبی هوا و دبی آب و P_{max} بیشینه فشار گذرا (بیک فشار) است. زمان صفر در این شکل نیز لحظه ایجاد فشار بیشینه گذرا است. همانگونه که شکل نشان می‌دهد، فشار گذرا در این نقطه از لوله با زمان کاهش می‌یابد تا پس از طی مدت زمانی که برای جریان دوفازی و تک‌فازی متفاوت است، مقدار آن به فشار اولیه در مجرا برسد. بررسی زمان کاهش فشار در این شکل نشان می‌دهد، میرا شدن فشار در حالت دوفازی سریع‌تر از حالت تک فازی اتفاق می‌افتد که این مسئله به دلیل نقش هوا در میرا کردن فشارهای وارده است. مطالعات نشان می‌دهند در جریان‌های گذرای دوفازی هوا و آب، هوا به عنوان عامل اصلی در میرا کردن فشار، نقش مهم‌تری نسبت به افتهای موضعی در لوله دارد. علت این پدیده ممکن است افزایش ویسکوزیته جریان به علت وجود هوا، لغزش بین حبابهای هوا و آب و یا تبادل حرارتی بین حبابهای هوا و مایع اطراف آن باشد [۱۵-۱۷]. همچنین شکل ۳، معیاری برای مقایسه بیشینه فشار گذرای دوفازی نسبت به تک‌فازی در مجاورت دریچه ارائه می‌دهد. با وارد شدن هوا در جریان، ابتدا فشار گذرای دوفازی از فشار گذرای تک فازی با همان دبی آب کمتر است. این مسئله ممکن است به این دلیل باشد که مقدار هوای موجود در جریان هنوز آن قدر زیاد نشده است که باعث کاهش چشمگیری در سرعت موج فشاری در جریان شود. با اضافه شدن هوا، فشار گذرای دوفازی افزایش می‌یابد تا جایی که از فشار گذرای تک فازی بیشتر می‌شود. با دقت در شکل ۳، مشخص است که در جریان دوفازی با افزایش میزان هوا در جریان، فشار بیشینه که در لحظه صفر اتفاق می‌افتد، افزایش می‌یابد. علت این امر این است که وجود هوا در جریان باعث کاهش سرعت موج فشار برگشتی می‌شود، لذا پیوند ضربه قوچ در مجرا افزایش می‌یابد و این امر باعث کاهش نسبت زمان بسته شدن دریچه به زمان رفت و برگشت موج فشاری می‌شود که منجر به افزایش فشارهای بیشینه می‌گردد. این موضوع در شکل ۴ که تغییرات فشار بیشینه گذرای دوفازی در مجاورت دریچه در مقابل تغییرات نسبت دبی هوا به آب را نشان می‌دهد، به وضوح قابل مشاهده است.

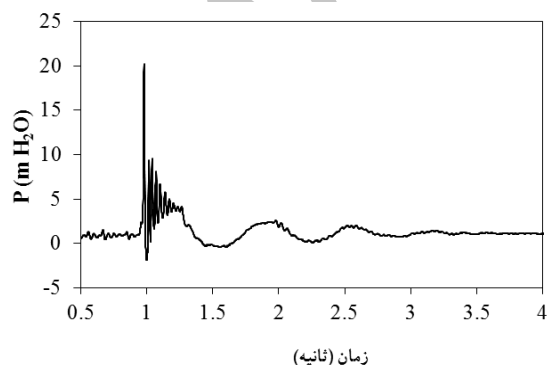
مقایسه بین فشار اولیه در مجرا که با خط چین نمایش داده شده و فشارهای گذرا در شکل ۴ نشان می‌دهد که فشار گذرای دوفازی در جریان لخته‌ای می‌تواند تا 50 برابر فشار اولیه در مجرا افزایش یابد. شکل ۵ تغییرات نسبت فشار بیشینه گذرای دو فازی به

¹ Peak Pressure

شکل ۷ تغییرات فشار در بالادست مجرا ($x/L > 0.1$) را نشان داده و ادعای بالا مبنی بر کاهش فشار با افزایش میزان هوا را که در شکل ۶ نیز دیده شد، اثبات می‌کند. مقایسه شکل‌های ۶ و ۷ نشان می‌دهد که در یک دبی هوا و آب ثابت، در نقاط بالادست ۱۰ درصد طول انتهای مجرا، تغییرات فشار چندان قابل توجه نبوده و فشارها با چشم‌پوشی از نوسانات بسیار کم، تقریباً ثابت می‌یابند. این پدیده دقیقاً بر خلاف ۱۰ درصد طول انتهای مجرا است که فشارها با میزان هوا در جریان افزایش می‌یابند (شکل ۴). الگوی تغییرات فشار، تفاوت‌های قابل توجهی را تحت تأثیر وجود حبابهای هوا در طول مجرا نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که در $x/L < 0.1$ ، فرکانس تغییرات فشار بسیار زیاد (زمان تناوب کم) و پیک فشارها زیاد است. فشار در مدت بسیار کوتاهی به پیک خود رسیده و پس از یک سری نوسانات بسیار سریع و شدید کاهش یافته و در مدت زمان بسیار کمی میرا می‌شود. شکل ۸ نمونه‌ای از این الگوی فشار را در مجاورت دریچه نشان می‌دهد.

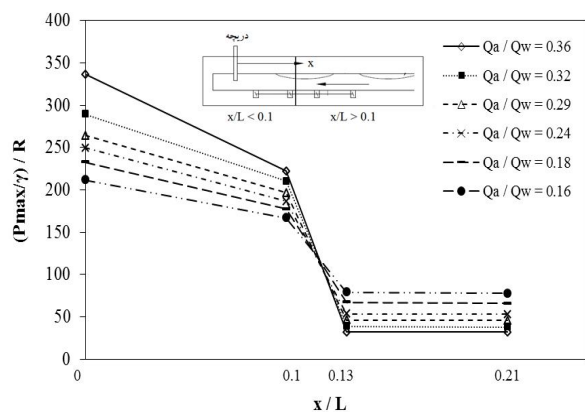


شکل ۷- تغییرات فشار بیشینه دوفازی در مقابل نسبت دبی هوا به آب در بالادست لوله ($x/L > 0.1$)



شکل ۸- تغییرات فشار گذرا با زمان در مجاورت دریچه برای یک دبی آب و هوا به‌عنوان نمونه

شکل ۶ تغییرات فشار گذرا در طول مجرا را در نسبت‌های مختلف دبی هوا به آب نشان می‌دهد. در این شکل L طول مجرا، x فاصله از دریچه به سمت بالادست و R شعاع هیدرولیکی مجرا است. در مجاورت دریچه ($x/L=0$) فشارهای گذرا بیشترین مقدار خود را دارند که به دلیل نزدیکی به دریچه، این مسئله دور از انتظار نیست. با دور شدن از دریچه به سمت بالادست، فشارهای ضربه‌ای توسط حبابهای هوا جذب می‌شوند، به نحوی که با افزایش حجم هوا در طول جریان، فشارهای گذرا در نقاط بالادستی به شدت افت پیدا می‌کنند. نتایج آزمایش‌های انجام شده نشان داد از انتهای مجرا (مجاور دریچه) تا $x/L=0.1$ ، افت فشار در مجرا نسبت به بالا دست چندان قابل توجه نیست، به نحوی که در این نقطه، فشارها تا ۴۰ درصد کاهش می‌یابند. اما همانگونه که در شکل ۶ مشخص است، با بیشتر شدن فاصله از دریچه ($x/L > 0.1$)، فشارها به شدت افت پیدا می‌کنند و حدود شش برابر کوچک می‌شوند. مهم‌تر آنکه، ترتیب توالی میزان فشارها با گذر از این حد عوض می‌شود، یعنی در ۱۰ درصد انتهای مجرا پیک فشار با افزایش نسبت دبی‌ها زیاد می‌شود، اما در بقیه طول مجرا پیک فشار با این نسبت کاهش می‌یابد. علت این کاهش توسط یک ویژگی هوا به نام اثر بالشتکی حباب هوا^۱ توجیه می‌شود [۱۲ و ۱۳]. حبابهای هوا به‌عنوان یک جذب کننده شوک^۲ فشار عمل کرده و از میزان فشارها به شدت می‌کاهند. هوا به مراتب از آب تراکم‌پذیرتر است و همزمان با افزایش فشار، متراکم شده و سهم زیادی از فشار وارده را تحمل می‌کند. هرچه هوای درون مجرا بیشتر باشد، سهم هوا در تحمل فشار وارده بیشتر و سهم آب کمتر می‌شود. به همین دلیل است که افزایش دبی هوا در مجرا باعث کاهش فشار وارده به آب در بالادست می‌شود.

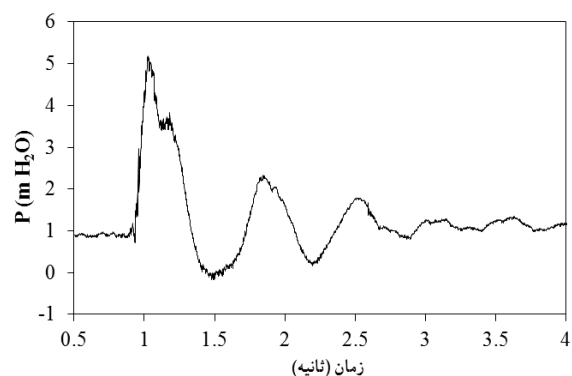


شکل ۶- تغییرات فشار بیشینه گذرای دوفازی در طول مجرا

¹ Cushioning effect of air bubble
² Shock Absorber

تجربیات قبلی و یا حدس و گمان انجام شود. حتی گاهی مهندسان از بررسی رفتار سازه در این نوع جریان صرف نظر کرده و طراحی را بر مبنای جریان تک فاز بدون در نظر گرفتن نقش هوا که می تواند مثبت و یا منفی باشد، انجام می دهند. در این تحقیق تغییرات الگوی فشار ایجاد شده بر اثر پدیده گذرای ضربه قوچ در یک مجرا مستطیلی افقی حاوی جریان دوفازی لخته ای مورد بررسی قرار گرفت. بررسی نتایج آزمایش های انجام شده نشان داد که الگوهای تغییرات فشار در دو قسمت مشخص شده یعنی ۱۰ درصد انتهایی طول لوله (نزدیک دریچه) و بقیه آن، تفاوت های چشمگیری را نشان می دهد. در ۱۰ درصد طول انتهای مجرا ($x/L < 0.1$) فشار گذرا مقدار قابل توجهی دارد، به گونه ای که در مجاورت دریچه بیشترین مقدار فشار ضربه ای ثبت می شود. همچنین، فشار با فرکانس زیادی تغییر می کند و زمان میرا شدن فشار کم است. در این قسمت از لوله، نقش هوا در جریان کاهش سرعت موج فشاری و در نتیجه تأخیر در بازگشت موج به سمت دریچه و افزایش فشارهای گذرا است، به گونه ای که در این قسمت از لوله با افزایش مقدار هوا، فشار تا ۵۰ برابر فشارهای اولیه افزایش می یابد. اما در بالادست این حد طولانی تری میرا می شود. در این قسمت از طول لوله اثر بالشتکی حبابهای هوا باعث افت فشار ضربه ای ایجاد شده در اثر ضربه قوچ شده و لذا با افزایش هوا در جریان، فشار گذرا کاهش می یابد. نتایج نشان می دهند که با افزایش میزان هوا در جریان، فشار گذرا در مجاورت دریچه تا ۱/۲۷ برابر فشار در جریان تک فازی (آب) افزایش می یابد، لذا در طراحی خطوط لوله ای که ممکن است در معرض جریان دوفازی قرار بگیرند، این فشار اضافی باید لحاظ گردد.

اما در $x/L > 0.1$ ، فرکانس تغییرات فشار کم، پیک فشارها در مقایسه با حالت قبل ناچیز، زمان رسیدن به پیک فشار زیاد و زمان میرا شدن فشارها نیز طولانی است. شکل ۹ نمونه ای از رفتار ذکر شده را در $x/L = 0.13$ ، نشان می دهد. نکته مهمی که باید به آن توجه داشت، این است که با اینکه فشارهای ایجاد شده در طول مجرا به مراتب از فشارهای گذرا در مجاورت دریچه کمتر است، اما این فشارها ممکن است به خودی خود آنقدر زیاد باشند که به خط لوله آسیب های جدی وارد کنند، لذا این مسئله باید در طراحی مد نظر قرار گیرد. همچنین، تغییرات اندازه فشارها در برداشت های مختلف در یک آزمایش مشابه، در طول مجرا متفاوت است.



شکل ۹- تغییرات فشار گذرا با زمان در بالادست ($x/L > 0.1$) برای یک دبی آب و هوا به عنوان نمونه

۴- نتیجه گیری

کمبود اطلاعات و ناکافی بودن تحقیقات آزمایشگاهی و تئوری در زمینه جریان های گذرای دوفازی باعث شده است که امروزه طراحی سازه های هیدرولیکی در این زمینه، بیشتر بر مبنای

۵- مراجع

- 1- Levy, S., (1999), *Two-phase flow in complex systems*, 1st Ed., John Wiley and Sons, Inc., New York.
- 2- Kabiri-Samani, A.R., (2009), "Fluctuating characteristics of two-phase air-water slug flow in pressurized pipelines." *J. of Water and Wastewater*, 70, 62-68. (In Persian)
- 3- Ghidaoui, M. S., Zhao, M., McInnis, D. A., and Axworthy, D. H. (2005). "A review of water hammer theory and practice." *Transactions of the ASME*, 58, 49-76.
- 4- Lee, T.S., Low, H.T., Nguyen, D.T., and Neo, W.R.A. (2009). "Experimental study of check valves performances in fluid transient." *J. of Process Mechanical Engineering*, 223(2), 61-69.
- 5- Bonin, C.C. (1960). "Water-hammer damage to Oigawa power station." *ASME J. of Engineering for Power*, 82, 111-119.
- 6- Parmakian, J. (1955). *Water-hammer analysis*, Prentice-Hall Englewood Cliffs, N.J., (Dover Reprint, 1963).
- 7- Ivetic, M. (2004). "Forensic transient analyses of two pipeline failures." *Urban Water Journal*, 1(2), 85-95.
- 8- Whiteman, K. J., and Pearsall, I. S., (1962), "Reflux valve and surge tests at a station." *Fluid Handling*,

- 8, 248-250.
- 9- Jonsson, L. (1985). "Maximum transient pressures in a conduit with check valve and air entrainment." *Proc. Int. Conf. on the Hydraulics of pumping stations*, Manchester, BHRA, Cranfield, 55-76.
- 10- Panet, M., and Martin, R. (1988). "Tests of check valves at EDF: Development of a damped check valve." *Second International Conference on Development in Valves and Actuators for Fluid Control*, Manchester, England.
- 11- Zhou, F., Hicks, F. E., and Steffler, P.M. (2002). "Transient flow in a rapidly filling horizontal pipe containing trapped air." *J. of Hydraulic Engineering*, 128(6), 628-634.
- 12- Stevanovic, V.D. (2009). "Dynamic loads by various water hammer phenomena." *Structural Integrity and Life*, 9(1), 51-56.
- 13- Giot, M. (2004). *Two-phase flow water hammer transients and induced loads on materials and structures of nuclear power plants*, FIKS-CT-2000-00106, Research Program, UCL/TERM, Belgium.
- 14- Hammersley, R.J., and Elicson, G.T. (2000). "Two-phase flow and water-hammer transient assessments with the TREMOLO computer code." *International Meeting on "Best-Estimate" Methods in Nuclear Installation Safety Analysis (BE-2000)*, Washington, DC.
- 15- Taylor, G.I. (1954). "The coefficients of viscosity for an incompressible liquid containing air bubbles." *Proc. R. Soc. A.*, 226, 34-39.
- 16- Van Wijngaarden, L., (1976). "Some problems in the formulation of the equations for gas/liquid flows." W. T. Koiter, W.T. (Ed.) *Theoretical and applied mechanics*, North-Holland, Amsterdam.
- 17- Ewing, D.J.F. (1980). "Allowing for free air in water hammer analysis." *Proc. 3rd Int. Conf. on Pressure surges*, Canterbury, HBRA, Cranfield, 80-90