

بررسی مشخصات نوسانی جریان تپشی دو فازی آب-هوا در مجاری تحت فشار

عبدالرضا کبیری سامانی^۱

(دریافت ۸۷/۳/۱۱ پذیرش ۸۷/۱۱/۱۵)

چکیده

در برخی از پروژه‌های عملی و مهندسی، نظیر صنایع شیمیایی، تولید انرژی، انتقال نفت و سازه‌های هیدرولیکی، گاهی جریان مایع مقدار قابل ملاحظه‌ای از گاز را با خود به سیستم وارد می‌نماید. بررسی ویژگی‌های هیدرولیکی جریان‌های دو فازی، یکی از موضوعات مهم و اساسی در مهندسی سازه‌های هیدرولیکی به شمار می‌رود. این نوع جریان در سازه‌هایی نظیر تونل‌های تحت فشار، کالورت‌ها، سیفون‌ها و خمها رخ می‌دهد. در اثر ورود هوا به مجرا، اندرکنش شدیدی بین جریان آبی که از سازه عبور می‌کند و هوایی که در مجاورت آب حرکت می‌کند به وقوع می‌پیوندد. جریان‌های دو فازی بر حسب شرایط هندسی، مشخصات فیزیکی سیالات و مشخصات هیدرولیکی جریان نظیر دبی‌های هوا و آب و شیب مجرا، به گروه‌های مختلفی نظیر چینه‌ای، موجی و تپشی (لخته‌ای) تقسیم‌بندی می‌شوند. در این پژوهش با استفاده از تصاویر تهیه شده از مدل و نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده، به بررسی آزمایشگاهی مشخصات نوسانی جریان تپشی تشکیل شده در یک مجرای تحت فشار پرداخته شد. این مجرا شامل کسر فضای خالی و پر بود، طول و سرعت موج لخته‌ای بود. بررسی‌ها نشان داد که تغییر شیب مجرا و دبی هوا تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر تغییرات پارامترهای مورد بررسی دارند. در این تحقیق طول حباب هوا حدوداً یک سوم طول موج و حداکثر برابر نصف طول موج بود و طول امواج تپشی، دامنه تغییراتی در محدوده ۱۰ تا ۸۵ برابر قطر داشت.

واژه‌های کلیدی: مشخصات نوسانی، جریان دو فازه، جریان تپشی، مجرای تحت فشار.

Fluctuating Characteristics of Two-Phase Air-Water Slug Flow in Pressurized Pipelines

Abdorrezza Kabiri-Samani¹

(Received June 1, 2008 Accepted Jan. 11, 2009)

Abstract

Two-phase gas-liquid flows occur in a wide variety of situations, e.g., in chemical processing, power generation, water supply systems, and petroleum industry. The study of two-phase fluid flows is of great importance in hydraulic engineering. This type of flow typically occurs in pressurized flow tunnels, culverts, siphons, and bends in which the gas trapped in water pipelines releases from the water as the pressure reduces. The relative discharge rate of fluids and the pipe slope produce a wide variety of flow patterns including stratified, wavy, and slug flows. In this paper, the unstable two-phase air-water flow is experimentally investigated. The image processing technique is applied for estimating the fluctuations of such parameters as void fraction and length, period and celerity of slug waves. It is shown that the pipe inclination and air flow rate have significant effects on flow characteristics. Also, the relative wave length (L/D , D is the pipe diameter) in a slug flow varies from 10 to 85, while air bubble length varies from $1/3$ to $1/2$ of wave length.

Keywords: Fluctuations, Two-Phase Flow, Slug Flow, Pressurized Pipeline.

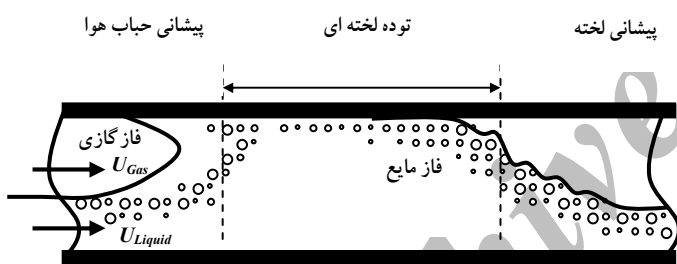
1. Assist. Prof., Civil Eng. Dept., Isfahan Univ. of Technology,
(+98 311) 3913829 akabiri@cc.iut.ac.ir

۱- استادیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۳۹۱۳۸۲۹ (۳۱۱)
akabiri@cc.iut.ac.ir

منحنی‌های توپولوژی توزیع زمانی فازها بر اساس سیگنال‌های خروجی دریافتی از الکترودهای پیش‌بینی شده در محیط مجرا می‌توان اشاره کرد. دانگ^{۱۷} و همکاران، به بررسی رژیم‌های جریان و شناسایی آنها به روش تصویری و با بهره‌گیری از خواص رسانایی آب در مقابل هوا پرداختند [۱۴]. آزوپاردی^{۱۸} و بیکر^{۱۹}، مشخصات ساختارهای نوسانی جریان‌های دو فاز آب و هوا را بررسی کردند [۱۵]. تحقیق ایمبل^{۲۰} و زچ^{۲۱}، مطالعه آزمایشگاهی جریان‌های نوسانی و متناوب در یک مدل مجرای فاضلاب بود [۱۶]. وانگ^{۲۲} و همکاران، به بررسی آزمایشگاهی نوسانات ناشی از جریان گاز-مایع دو فاز در اتصالات T شکل پرداختند [۱۷]. در این تحقیق مشخصات نوسانی جریان دو فاز گاز-مایع در محل اتصال دو مجرا مورد بررسی قرار گرفت. مطالعات آزمایشگاهی و عددی نشان می‌دهند که توده‌های هوای محبوس می‌تواند در سازه‌های هیدرولیکی باعث ایجاد تأثیرات نامطلوب و حتی خرابی سازه شود. در واقع به صورت متناوب مکشهایی در جریان صورت می‌گیرد و این مکشها توده‌های حجیمی از هوا را به داخل آبگیر و مجرای جریان آب هدایت می‌نمایند. ورود هوا با وجود اینکه می‌تواند مشکلاتی را در تأسیسات ایجاد نماید، باعث تغییر رژیم جریان و مشخصات فیزیکی و هیدرولیکی آن می‌گردد.

جریان‌های دو فاز آب و هوا در سازه‌های هیدرولیکی گوناگون اعم از سیستم‌های انتقال آب، کانال‌های باز با جریان سریع آب و سرریزها، سرریزهای نیلوفری^۱، شفت‌های قائم^۲، لوله‌های خمیده (سیفون‌های معکوس)، کالورت‌ها، تونل‌ها و مجاری آب‌بر، مشاهده شده‌اند [۱]. جریان‌های دو فاز بسته به مشخصات هیدرودینامیکی جریان و مشخصات هندسی مجرا و خصوصیات فیزیکی سیالات ترکیب شونده، به الگوهای مختلفی تقسیم می‌شوند. مهم‌ترین الگوهای محتمل در تونل‌های تحت فشار و مجاری بسته الگوهای تپشی، موجی و چینه‌ای است. رژیم جریان چینه‌ای وقتی رخ می‌دهد که مایع در پایین و هوا در بالا قرار گیرد و اندرکنش بین دو فاز، حداقل مقدار ممکن باشد. با افزایش دبی هوا نسبت به شرایط رژیم چینه‌ای، رژیم موجی رخ می‌دهد و امواجی یکنواخت در طول مجرا انتقال می‌یابند. اگر دبی جریان هوا باز هم افزایش یابد، امواج جداره فوقانی، مجرا را لمس می‌نمایند و در نتیجه رژیم جریان تپشی (لخته‌ای) به وقوع می‌پیوندد (شکل ۱). معادلات عمومی جریان دو فاز در قالب‌هایی نظیر مدل هموژن^۳ و مجزا ارائه گردید [۲]. تأثیر جریان هوا بر متغیرهای هیدرولیکی جریان آب در لوله‌ها و مجاری بسته، توسط محققانی نظیر هولی^۴، آلبرتسون^۵ و اندرو^۶، مارتین^۷، هامام^۸ و مک کورکودال^۹، کاردل^{۱۰} و همکاران، لی^{۱۱} و مک کورکودال، زهو^{۱۲} و همکاران، عیسی^{۱۳} و کمپف^{۱۴} و ... مورد مطالعه قرار گرفته است [۳-۱۱]. هولی، به مطالعه جریان در شرایطی پرداخت که یک مجرای افقی به صورت ناگهانی پر می‌شود و این مسئله سبب تله‌اندازی توده‌های هوای درون مجرا می‌شود [۳]. در ارتباط با بررسی ویژگی‌های نوسانی جریان‌های پرودیک دو فاز می‌توان به موارد زیر اشاره کرد. کبیری و همکاران به بررسی نوسانات فشار در طول و مقطع مجرای دایره‌ای حاوی جریان همزمان آب و هوا پرداختند [۱۲]. سلقیم^{۱۵} و هرویو^{۱۶}، در زمینه‌ی مصور سازی مستقیم جریان‌های دو فاز با اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی تحقیق نمودند [۱۳]. از خروجی‌های این روش به

1 Morning Glory
2 Vertical Shafts
3 Homogeneous
4 Holey
5 Albertson
6 Andrews
7 Martin
8 Hamam
9 McCorquodale
10 Cardle
11 Li
12 Zhou
13 Issa
14 Kempt
15 Selegim
16 Hervieu



شکل ۱- شمایی از جریان تپشی

علی‌رغم تمامی مطالعات انجام شده، در حال حاضر نقصان اطلاعاتی شدیدی در ارتباط با استانداردها و مشخصات هیدرولیکی جریان‌های دو فاز وجود دارد. لذا در این مقاله به مطالعه نمونه آزمایشگاهی یک تونل تحت فشار در معرض جریان دو فاز آب و هوا پرداخته شد. در این تحقیق از مدل آزمایشگاهی شامل دبی آب و هوا و تغییرات فشار با زمان در موقعیتهای طولی و عمقی مختلف و همچنین شرایط مختلف از نظر طول توده تپشی

17 Dong
18 Azzoparidi
19 Baker
20 Aimable
21 Zech
22 Wang

مایع، حباب هوا و پیروید شکل‌گیری امواج تپشی اطلاعات برداشت شد.

۲- مدل آزمایشگاهی و برداشت اطلاعات

مدل طراحی شده، مطابق شکل ۲ شامل مجرای اصلی انتقال آب با قطر داخلی ۹ سانتی‌متر و طول ۱۰ متر با جداره شفاف بود. در طول لوله حدود ۳۰۰ پیرومتر برای اندازه‌گیری نوسانات فشار نصب شد. متغیرهای آزمایش شامل شیب مجرا، دبی هوا، دبی آب و موقعیتهای طولی و موقعیتهای عمقی سنجش فشار می‌باشد. برای برداشت اطلاعات مربوط به مشخصات موج لخته‌ای نظیر پیروید و تعداد در واحد زمان، از یک دستگاه کرنومتر با دقت صدم ثانیه استفاده گردید. برای برداشت اطلاعات مربوط به ارتفاع لخته و عمق آب در داخل مجرا و نیز استخراج سرعت لخته درون مجرا، از دوربین دیجیتال با ظرفیت ۸ عکس در ثانیه و برای تعیین مقدار دبی هوا از یک دستگاه روتامتر^۱ و برای تعیین دبی آب از یک سرریز لبه‌تیز مثالی با زاویه رأس ۹۰ درجه و مانومتر^۲ با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شد. طول لخته با نصب خط‌کش و اشل روی لوله و عکس‌برداری تعیین گردید.

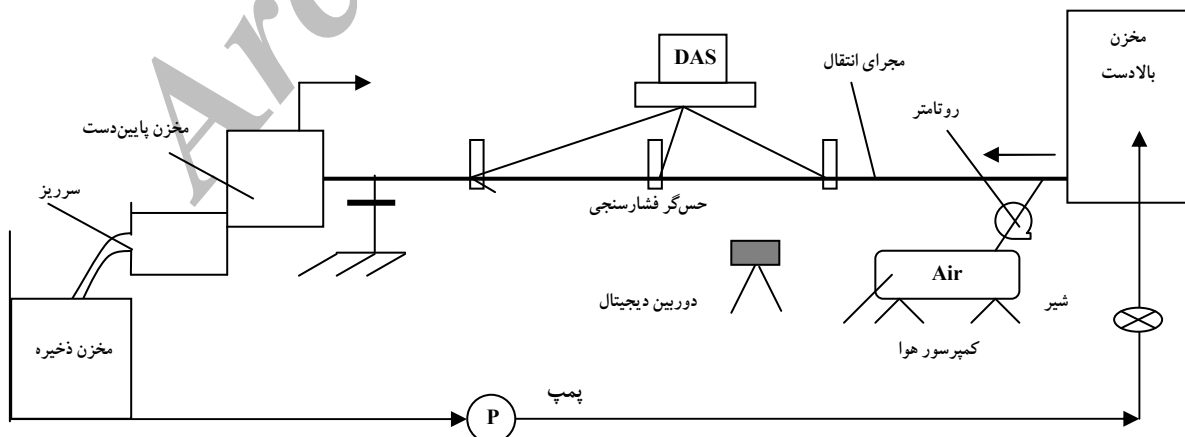
۳- کاربرد روش پردازش تصاویر برای استخراج اطلاعات مدل

در این تحقیق برای اینکه بتوان از روش پردازش تصاویر^۳ بهره گرفت، از دو دستگاه دوربین عکس‌برداری با قابلیت برداشت هشت

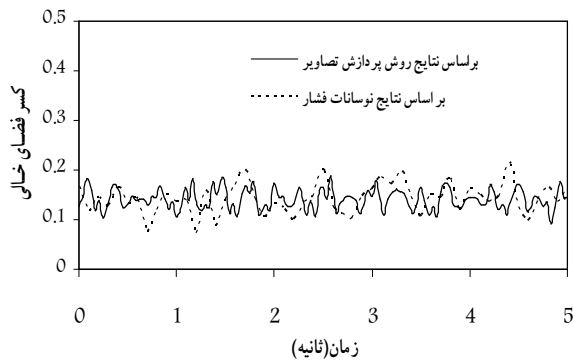
- 1 Rotameter
- 2 Manometer
- 3 Image Processing

قاب با کیفیت بالا استفاده شد. با استفاده از این دوربین‌ها علاوه بر عکس‌برداری مستمر در زمان، کلیپ‌های کوتاهی نیز تهیه گردید. این کلیپ‌های کوتاه عموماً در محدوده زمانی ۵ ثانیه تهیه شدند، سپس با استفاده از نرم‌افزار تصویرسازی^۴ به عکس با فرمت BMP تبدیل گردیدند. پس از تبدیل فیلم‌ها به عکس، با استفاده از نرم‌افزار فتوشاپ^۵، تصاویر بازسازی و با اشل‌بندی تصاویر در فتوشاپ اطلاعات مختلف نظیر طول موج و ارتفاع آب در داخل لوله تعیین شد. با استفاده از این تصاویر می‌توان ارتفاع آب در هر موقعیت طولی را به دست آورد و با استفاده از عمق آب در داخل لوله و تعیین مساحت اشغال شده توسط هر یک از فازها و سپس تعیین و تخمین حجم بر اساس شبکه ایجاد شده، می‌توان میزان کسر فضای خالی یا کسر حجمی مایع را به دست آورد. در نهایت با استفاده از این اشکال، خروجی‌های قابل محاسبه عبارت‌اند از: عمق آب و هوا در مجرا، نسبت سطح مقطعهای جریان هر یک از دو فاز، طول موج و طول توده هوا و کسر فضای خالی یا کسر حجمی مایع. پارامترهای مورد استفاده در این تحلیلها، عمق آب در مخزن بالادست (h)، دبی جریان آب (Q_w) و دبی جریان هوا (Q_a) بودند. همچنین با استفاده از این عکسها امکان تعیین سرعت موج تپشی نیز وجود دارد. شکل ۳، نمونه‌ای از تغییرات عمق آب در مجرا را با زمان نشان می‌دهد. اطلاعات هیدرولیکی و هندسی مربوط به این شکل عبارت‌اند از: دبی هوا برابر ۱/۱۱۷ لیتر بر ثانیه، دبی آب برابر ۴/۵۰۴ لیتر بر ثانیه، عمق آب در مخزن بالادست ۲۹/۵ سانتی‌متر و شیب مجرا برابر صفر. شکل ۴، نمونه‌ای از تغییرات عمق هوا در مجرا را بر حسب زمان نشان می‌دهد. در این مورد نیز از عکسهای برداشت شده و همچنین با قرائت سطح آب و اختلاف

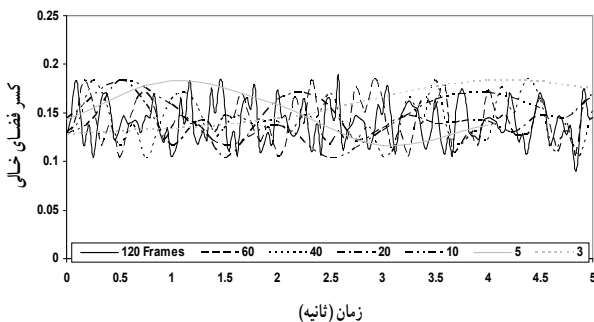
⁴ XingMPEG Player
⁵ Photoshop



شکل ۲- شمای کلی بخشهای مختلف مدل آزمایشگاهی



شکل ۵- تغییرات کسر فضای خالی با زمان در شرایط
 $Q_a=1.117 \text{ L/s}$, $Q_w=4.504 \text{ L/s}$, $h=29.5 \text{ cm}$

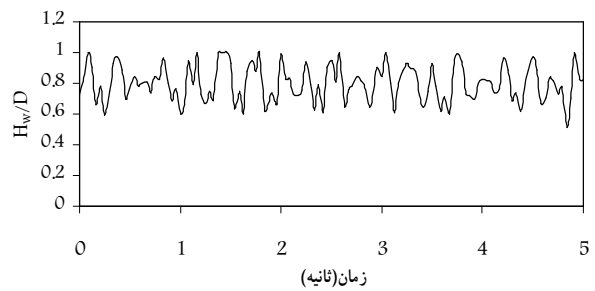


شکل ۶- تغییرات کسر فضای خالی با زمان و تعداد برداشت در
 ثانیه: $(Q_a=1.117 \text{ L/s}$, $Q_w=4.504 \text{ L/s}$, $h=29.5 \text{ cm})$

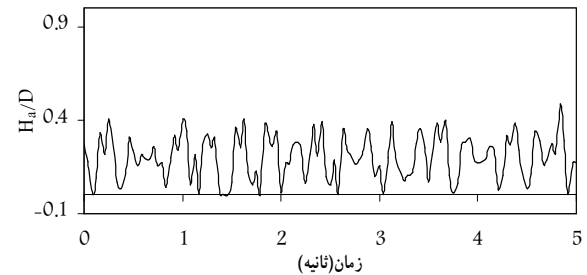
در این رابطه:

C سرعت موج لخته‌ای بر حسب متر بر ثانیه، L طول موج لخته‌ای بر حسب متر و T پریود موج لخته‌ای بر حسب ثانیه است. شکل ۷، منحنی تغییرات متوسط پریود موج را در شیب‌های مختلف بر حسب نسبت دبی هوا و آب نشان می‌دهد. با توجه به این شکل واضح است که با افزایش شیب مجرا نسبت به افق (شیب منفی) پریود موج کاهش می‌یابد. در ضمن می‌توان مشاهده نمود که با افزایش نسبت دبی هوا به دبی آب، پریود موج افزایش یافته است. شکل ۸، منحنی تغییرات طول موج در رژیم جریان تپشی را بر حسب نسبت دبی هوا و آب برای شیب‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، تا جایی که نسبت دبی هوا به آب معادل $1/3$ است، طول موج افزایش می‌یابد و سپس با عبور از یک اوج، مقدار آن با شیب کمتری نسبت به حالت افزایشی، کاهش پیدا می‌کند.

شکل ۹، منحنی تغییرات سرعت موج را بر حسب نسبت دبی برای شیب‌های مختلف نمایش می‌دهد. برای تعیین سرعت موج از حاصل تقسیم طول موج بر پریود موج تپشی در رژیم مورد بررسی



شکل ۳- نمونه‌ای از تغییرات عمق آب در مجرا با زمان



شکل ۴- نمونه‌ای از تغییرات عمق هوا در مجرا بر حسب زمان

آن نسبت به تراز سقف لوله، عمق یا ارتفاع توده هوا در مجرا تعیین گردید. تعداد برداشت‌ها در هر ثانیه ۲۴ عدد و جمعاً ۱۲۰ عکس برای برداشت اطلاعات از ارتفاع توده هوا مورد استفاده قرار گرفت. اطلاعات هیدرولیکی و هندسی مربوط به این شکل، در شکل ۳ نشان داده شده است.

بررسی‌ها نشان می‌دهد که طول موج در امواج تپشی به وجود آمده، عموماً در محدوده ۱۰ تا ۸۰ برابر قطر مجرا است. در ضمن در این بررسی مشخص گردید که طول حباب هوا حدوداً یک سوم طول موج و حداکثر برابر نصف طول موج می‌باشد. شکل ۵ نمونه‌ای از کسر فضای خالی محاسباتی را نشان می‌دهد. تغییرات کسر فضای خالی با زمان در روش پردازش تصاویر در شکل ۶ نشان داده شده است. در این روش نتایج حاصل از تعداد برداشت‌های مختلف مقایسه شدند. برای این منظور نتایج تبدیل فیلم ۵ ثانیه‌ای به ۳، ۵، ۱۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۱۲۰ قاب مورد مقایسه قرار گرفت. واضح است که هر چه تعداد برداشت‌ها بیشتر باشد دقت مربوط به محاسبه کسر فضای خالی نیز بیشتر می‌شود.

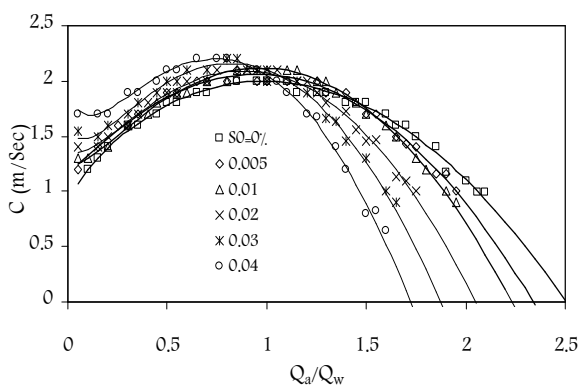
۴- مشخصه‌های ویژه جریان دو فازی

یکی از مهم‌ترین مشخصات جریان‌های نوسانی، سرعت موج است. برای تعیین و محاسبه سرعت موج از نسبت تقسیم طول موج به پریود موج به صورت رابطه ۱ استفاده شده است:

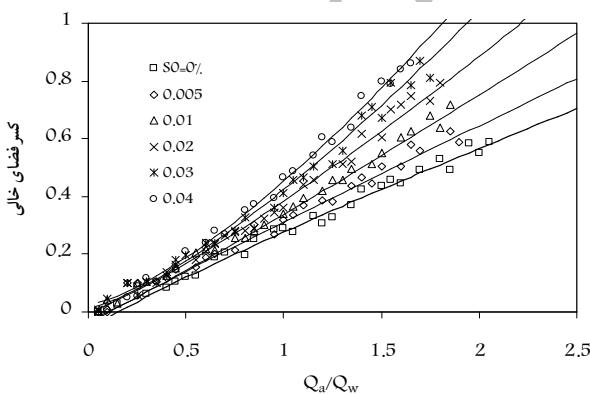
$$C = \frac{L}{T} \quad (1)$$

آمده نیز می توان سرعت موج تپشی را تخمین زد. به این صورت که اگر بتوان فاصله زمانی عبور موج از بین دو مقطع طولی مرجع را به دست آورد، می توان آنرا معادل سرعت عبور موج از مقطع مورد بررسی در نظر گرفت. از آنجا که در طول آزمایش ها سعی شده است کلیه مشخصات هندسی و هیدرولیکی هر مرحله از آزمایش ها ثابت بماند، بنابراین انتظار آن است که سرعت برداشت شده قابل تعمیم به کل طول لوله باشد. اگر فرض کنیم فاصله بین دو نقطه مرجع Δx باشد و در مدت زمانی عبور پیشانی موج از نقطه مرجع ۱ تا رسیدن به نقطه مرجع ۲، تعداد n فریم^۱ برداشت شده باشد و دستگاه عکس برداری مورد استفاده قابلیت برداشت m فریم را در هر ثانیه دارا باشد از نسبت تقسیم n/m می توان زمان عبور موج را بین دو مقطع به دست آورد، بنابراین با استفاده از رابطه ۲ می توان سرعت موج را تعیین نمود:

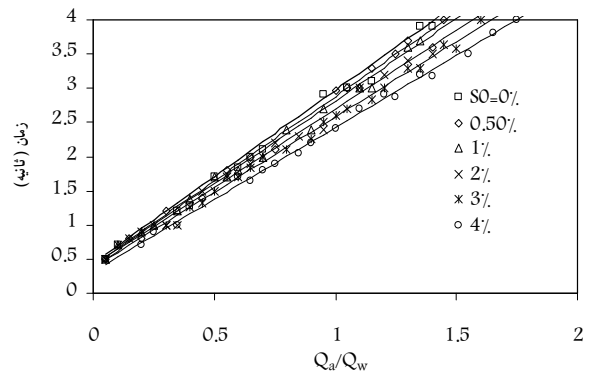
$$C = \frac{\Delta x}{n} \cdot m \quad (2)$$



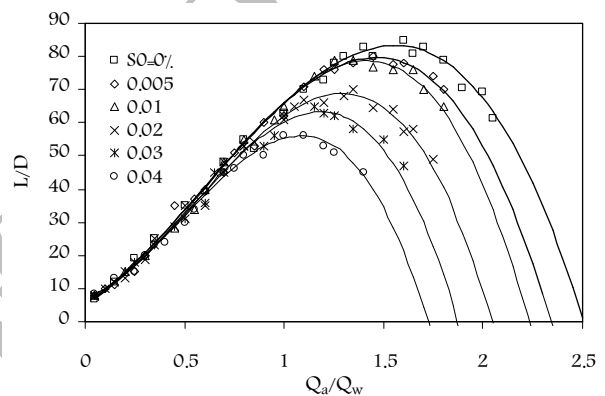
شکل ۹- منحنی تغییرات سرعت موج بر حسب نسبت دبی برای شیب های مختلف



شکل ۱۰- تغییرات کسر فضای خالی بر حسب نسبت دبی هوا و آب در شیب های مختلف



شکل ۷- منحنی تغییرات متوسط پریرود موج در شیب های مختلف بر حسب نسبت دبی هوا و آب

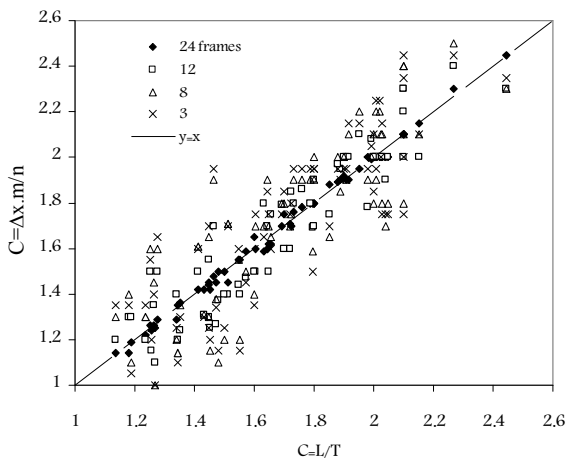


شکل ۸- منحنی تغییرات طول موج در رژیم جریان تپشی بر حسب نسبت دبی هوا و آب برای شیب های مختلف

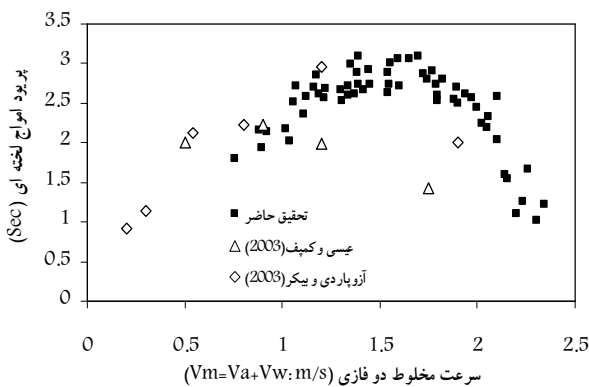
استفاده شد. مطابق این شکل، با افزایش نسبت دبی هوا به دبی آب، سرعت موج تا نسبت دبی حدود ۱/۲ افزایش می یابد و پس از این مقدار که در آن بسته به شیب، بیشینه مقداری بین ۱/۸ تا ۲/۲ متر بر ثانیه را می گیرد، مقدار سرعت موج کم می شود. نکته حائز اهمیت این است که در نمودار بالا قبل از رسیدن به بیشینه مقدار هر چه شیب مجرا بیشتر باشد، سرعت موج نیز بیشتر است، اما پس از گذر از بیشینه یعنی در نسبت دبی های بیش از ۱/۲، هر چه شیب مجرا بیشتر باشد، سرعت موج کمتر می شود.

شکل ۱۰، تغییرات کسر فضای خالی را بر حسب نسبت دبی هوا و آب در شیب های مختلف بر اساس جمع بندی اطلاعات ارائه شده در این بخش و با استفاده از قابلیت نرم افزار SPSS در تخمین توابع، ارائه نموده است. با دقت در این شکل، مشخص است که با افزایش شیب مجرا در نسبت دبی ثابت هوا و آب، کسر فضای خالی افزایش می یابد. در ضمن با افزایش شیب مجرا میزان رشد منحنی های کسر فضای خالی بیشتر می شود. با استفاده از تصاویر برداشتی و انجام آنالیز پردازش تصاویر بر روی عکسهای به دست

¹ Frame



شکل ۱۱- مقدار سرعت حاصل از اندازه‌گیری طول موج و پریود موج و استفاده از نسبت این دو پارامتر و استفاده مستقیم از روش پردازش تصاویر در شیب صفر درصد



شکل ۱۲- مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق با نتایج مراجع [۱۱ و ۱۵] در خصوص تغییرات پریود موج لخته‌ای با سرعت مخلوط آب و هوا

۵- نتیجه‌گیری

مطالعه ویژگی‌های نوسانی جریان دوفازی آب و هوا در سازه‌های هیدرولیکی تا به حال کمتر مورد توجه قرار گرفته است. در این تحقیق به مدل‌سازی آزمایشگاهی جریان دوفازی آب و هوا در تونل‌ها و مجاری تحت فشار و بهره‌گیری از تکنیک‌های پردازش تصاویر به منظور تعیین مشخصات ویژه نوسانی جریان دوفازی آب و هوا پرداخته شد. طبق بررسی‌ها، با افزایش دبی آب، طول موج امواج نوسانی و ارتفاع امواج کاهش می‌یابد. ضمناً با افزایش دبی هوا، ارتفاع موج و طول آن کوچک‌تر می‌شود. به صورت کیفی می‌توان ملاحظه کرد که با افزایش دبی هوا پریود امواج نوسانی منظم‌تر می‌شود، ضمن اینکه طول موج و پریود موج کاهش می‌یابد. کسر فضای خالی و دامنه نوسانات آن با افزایش دبی هوا، افزایش می‌یابد. بررسی انجام شده بر روی اطلاعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که طول موج در امواج لخته‌ای به وجود آمده عموماً در

در حین آزمایش‌ها، بر روی مجرا، خط‌کش و اشل نصب شد و فاصله ۲/۴ متری به عنوان مقطع عکس‌برداری انتخاب گردید. نقطه شروع این فاصله مرجع حدود ۶ متری از ابتدای لوله است. شکل ۱۱ مقادیر سرعت حاصل از روش قبل یعنی اندازه‌گیری طول موج و پریود موج و استفاده از نسبت این دو پارامتر و استفاده مستقیم از روش پردازش تصاویر را برای شیب صفر مقایسه نموده است. ملاحظه می‌شود که هر چه تعداد فریم‌های برداشت شده بیشتر باشد، میزان دقت بیشتر است. طبق شکل‌های بالا رابطه طول موج با نسبت دبی از درجه ۳ و رابطه پریود موج با نسبت دبی درجه ۱ (خطی) و رابطه سرعت موج با نسبت دبی نیز از درجه ۳ است. همچنین در این بررسی مشخص گردید که، ارتباط بین نسبت پریود موج و شیب یک رابطه‌نمایی به صورت رابطه ۳ و ارتباط نسبت سرعت موج با شیب مجرا، یک رابطه کسری به صورت رابطه ۴ است:

$$\frac{T}{T_0} = e^{-3.9S_0} \quad (3)$$

$$\frac{C}{C_0} = \frac{(1 + 2S_0)^2}{1 - S_0^2} \quad (4)$$

که در این روابط

S_0 ، T_0 و C_0 به ترتیب شیب مجرا، پریود امواج لخته‌ای در مجرای با شیب صفر و سرعت امواج لخته‌ای در مجرای با شیب صفر هستند.

شکل ۱۲ به مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق در خصوص تغییرات پریود موج لخته‌ای با سرعت مخلوط آب و هوا ($V_m = V_a + V_w$) که به ترتیب سرعت‌های هوا و آب می‌باشند، با نتایج مراجع [۱۱ و ۱۵] پرداخته است. مقایسه سه دسته اطلاعات اندازه‌گیری شده در خصوص پارامترهای مورد بررسی مبین آن است که همسازی نسبتاً خوبی بین نتایج وجود دارد. هرچند در برخی نقاط اختلاف قابل تأمل است، اما در هر حال روند تغییرات پارامترها شباهت خوبی با یکدیگر دارند. شایان ذکر است که نتایج محققان پیشین عمدتاً بر اساس مدل‌سازی آزمایشگاهی با اقطار کم صورت گرفته است. و در ارتباط با مجاری با اقطار بالا مشابه آنچه در مهندسی هیدرولیکی کاربرد دارد، مطالعه‌ای در این باره صورت نگرفته است. سیستم‌های دارای مجاری با قطر کم، معمولاً در صنایع حرارتی، برودتی و مجاری انتقال نفت و گاز کاربرد دارند و واضح است که در این مجاری، طبیعت هیدرولیکی جریان تغییر نموده و پارامترهایی نظیر کشش سطحی که معمولاً در مجاری با اقطار بزرگ قابل اغماض هستند، در اینجا اهمیت می‌یابند. بنابراین اختلاف نتایج عمدتاً می‌تواند به دلیل تغییر عوامل فیزیکی و هیدرودینامیکی باشد.

رخداده در مجرا بر اساس مشخصات هندسی مجرا و مشخصات هیدرولیکی جریان ارائه شد.

۶- تشکر و قدردانی

نویسنده مقاله به این وسیله از مساعدتهای دانشگاه صنعتی اصفهان و راهنماییهای ارزشمند جناب آقای دکتر سید محمود برقعی استاد دانشگاه صنعتی شریف تقدیر و تشکر می نماید.

محدوده ۱۰ تا ۸۵ برابر قطر مجرا است. طول حباب هوا نیز حدوداً یک سوم طول موج و حداکثر برابر نصف طول موج می باشد. با افزایش شیب مجرا نسبت به افق (شیب منفی) پریود موج کاهش می یابد. در مجموع در این تحقیق به بررسی مشخصات نوسانی امواج لخته ای در مجاری با اقطار بزرگ که معمولاً به عنوان سازه های انتقال آب مورد استفاده قرار می گیرند، پرداخته شد و روابط و نمودارهایی برای تعیین مشخصات نوسانی امواج لخته ای

۷- مراجع

- 1- Falvey, H. T. (1980). *Air-water flow in hydraulic structures*, Eng. Monograph, No. 41, US Department of the Interior, Water and Power Resources Service.
- 2- Lockhart, R. W., and Martinelli, R. C. (1949). "Proposed correlation of data for isothermal two-phase two-component flow in pipes." *Chem. Eng. Prog.*, 64 (193), 39-48.
- 3- Holley, E. R. (1969). "Surging in laboratory pipeline with steady inflow." *ASCE, J. Hydr. Eng.*, 95 (3), 961-979.
- 4- Albertson, M. L., and Andrews, J.S. (1971). *Transients caused by air release, in control of flow in closed conduits*, (J.P.Tullis, ed.), Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- 5- Martin, C.S. (1976). "Entrapped air in pipelines." *Proc. of the Second International Conference on Pressure Surges*, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, Bedford, London, England.
- 6- Hamam, M. A., and McCorquodale, J. A. (1982). "Transient conditions in the transition from gravity to surcharged sewer flow." *Canadian J. of Civil Engineering*, 9 (2), 189-196.
- 7- Cardle, J. A., Song, C. C. S., and Yuan, M. (1989). "Measure of mixed transient flows." *J. Hydr. Eng. ASCE*, 115 (2), 169-185.
- 8- Li, J., and McCorquodale, J. A. (1999). "Modeling mixed flow in storm sewers." *J. of Hydraulic Engineering*, 125 (11), 1170-1179.
- 9- Zhou, F., Hicks, F., and Steffler, P. (2002). "Transient flow in rapidly filling horizontal pipe containing trapped air." *J. Hydraulic Engrg.*, 128 (6), 635-639.
- 10- Zhou, F., Hicks, F., and Steffler, P. (2002). "Observation of air-water interaction in a rapidly filling horizontal pipe." *J. Hydr. Eng.*, 128 (6), 635-639.
- 11- Issa, R. I., and Kempf, M. H. W. (2003). "Simulation of slug flow in horizontal and nearly horizontal pipes with the two-fluid model." *Int. J. Multiphase Flow*, 29, 69-95.
- 12- Kabiri-Samani, A. R., Borghei, S. M., and Saidi, M. H. (2007). "Fluctuation of air-water two-phase flow in horizontal and inclined water pipelines." *J. of Fluid Eng., ASME*, 129 (1), 1-14.
- 13- Seleglim, P. J., and Hervieu, E. (1998). "Direct imaging of two-phase flows by electrical impedance measurements." *IOP Pub., Meas. Sci. Tech.*, 9, 1492-1500.
- 14- Dong, F., Liu, X., Deng, X., Xu, L., and Xu, L. A. (2001). "Identification of two-phase flow regimes in horizontal, inclined and vertical pipes." *I.O.P., Meas. Sci. Tech.*, 12, 1069-1075.
- 15- Azzopardi, B. J., and Baker, G. (2003). "Characteristics of periodic structure in gas/liquid two-phase flow." *Proc. UK/Japan Two-Phase Flow Meeting*, Guildford, UK.
- 16- Aimable, R., and Zech, Y. (2003). "Experimental results on transient and intermittent flows in a sewer pipe model." *XXX IAHR Cong., Theme B, AUTH, Thessaloniki, Greece*, 377-384.
- 17- Wang, S. F., Ozawa, M., and Shoji, M. (2003). *Fluctuation of gas-liquid two-phase flow through an impacting T-junction*, Research Program Report, Sasakawa Scientific Research, Japan Science Society, Japan.