

## بررسی آزمایشگاهی نوسانات فشار در مقطع مجاری آب بر حاوی جریان ناپایدار آب و هوا

عبدالرضا کبیری سامانی\*، سید محمود برقمی\*\* و محمد حسن سعیدی\*\*

دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی شریف

(دریافت مقاله: ۸۳/۵/۱۵ - دریافت نسخه نهایی: ۸۴/۷/۱۹)

چکیده - بررسی ویژگیهای هیدرولیکی جریانهای دو فازی، یکی از موضوعات مهم و اساسی در مهندسی هیدرولیک است. این نوع جریان در سازه‌هایی نظیر تونلهای تحت فشار، کالورتها، مجاری انتقال فاضلاب و اتصالات رخ می‌دهد. جریانهای دو فازی بر حسب شرایط هندسی و مشخصات فیزیکی سیالات و مشخصات هیدرولیکی جریان نظیر دبی‌های هوا و آب و شیب مجرا، به گروههای مختلفی نظیر حبابی، لایه نازک و یا توده‌ای تقسیم‌بندی می‌شوند. الگوی جریان چگونگی توزیع هر فاز جریان در برابر فاز دیگر است. از مهمترین الگوهای محتمل جریان آب و هوا در مجاری تحت فشار نظیر تونلهای آب بر می‌توان به الگوهای لخته‌ای، موجی و چینه‌ای اشاره کرد. ورود هوا به داخل آب و تشکیل جریان دو فازی واکنشهای شدید بین دو فاز و نوسانات شدید فشار را به همراه دارد و در نتیجه می‌تواند خسارتهای قابل ملاحظه‌ای در سازه تونل و تأسیسات جانبی ایجاد کند. در این مقاله نتایج آزمایشات انجام شده روی مدل آزمایشگاهی تونل تحت فشار که حاوی جریان همزمان آب و هواست، ارائه می‌شود. تحلیل نتایج نشان می‌دهد، با ورود هوا به تونل و شکل‌گیری جریان دو فازی، نوسانات شدید فشار در مجرا به وجود آمده و بسته به مشخصات هندسی مجرا و هیدرولیکی جریان، فشار ماکزیمم وارد بر مجرا می‌تواند تا ۱۰ برابر فشار هیدرواستاتیکی افزایش یابد. نتایج ارائه شده منحنیها و روابطی اند که نوسانات فشار (مقادیر فشار ماکزیمم و می‌نیمم) وارده بر مجرا و مرزبندیهای جریان و مشخصات هیدرولیکی ناپایداری را بر حسب متغیرهای هندسی مجرا و هیدرولیکی جریان نشان می‌دهند.

واژگان کلیدی: جریان دو فازی، الگوی جریان، جریان لخته‌ای، نوسانات فشار، مدل آزمایشگاهی

## Experimental Results of Pressure Fluctuations in a Water Conduit Section Due to Formation of Unstable Two-Phase Air-Water Flow

A.B. Kabiri Samani, M. Borghie and M.H Saeidi

Department of Civil Engineering, Sharif University of Technology

**Abstract:** The study of two-phase fluid flow behavior in hydraulic structures such as pressurized flow tunnels, culverts, sewer pipes, junctions and other similar conduits is of great importance. A two-phase mixture flowing in a pipe can exhibit several interfacial geometries such as bubbles, slugs or films, depending on the fluid and hydrodynamic properties of flow. The main variables, giving rise to a variety of flow patterns, include relative discharge rate of fluids and the pipe slope. The

\*\* - دانشیار

\* - دانشجوی دکترا

flow patterns mostly attainable with air and water include stratified include and slug patterns. In this paper, the experimental results of pressurized water tunnel model are presented. The results include pressure transient and its variations for different hydraulic and geometric properties. It is shown that trapped and released air can cause tremendous pressure surges in the system and, eventually, may cause failure in systems (e.g. the maximum pressure inside the pipe would reach up to 10 times of upstream hydrostatic pressure). Finally, relations for forecasting maximum and minimum pressure in these situations are presented as a function of mean pressure, flow characteristics and pipe geometry.

**Keywords:** Two-phase flow, Flow pattern, Slug flow, Pressure fluctuations, Experimental model

## فهرست علائم

|                   |                                  |                |                        |                        |                 |
|-------------------|----------------------------------|----------------|------------------------|------------------------|-----------------|
| Pa                | فشار متوسط بر حسب ارتفاع ستون آب | $P_h$          | غلظت متوسط هوا در مجرا | بی بعد                 | $\bar{C}$       |
| $m^3/s$           | دبی                              | Q              | سرعت موج لخته‌ای       | m/s                    | c               |
| بی بعد            | عدد رینولدز                      | Re             | قطر مجرا               | m                      | D               |
| s                 | پریود موج لخته‌ای                | T              | عدد فرود               | بی بعد                 | Fr              |
| s                 | زمان                             | t              | عدد فرود موج لخته‌ای   | بی بعد                 | Fr <sub>c</sub> |
| m/s               | سرعت آب                          | $V_w$          | تابع                   | بی بعد                 | f               |
| بی بعد            | عدد وبر                          | We             | ضریب اصطکاک دو فازی    | بی بعد                 | f <sub>TP</sub> |
| m                 | عمق هیدرولیکی                    | $y_e$          | سرعت جرمی دو فازی      | kg/(m <sup>2</sup> .s) | G               |
| بی بعد            | کسر فضای خالی گاز                | $\alpha$       | شتاب ثقل               | m/s <sup>2</sup>       | g               |
| بی بعد            | نسبت دبی هوا و آب                | $\beta$        | ارتفاع موج لخته‌ای     | m                      | H               |
| بی بعد            | شیب مجرا                         | $S_0, \varphi$ | عمق آب در مخزن بالادست | m                      | h <sub>1</sub>  |
| Pa.s              | لزجت                             | $\mu$          | مشخصه طولی             | m                      | L               |
| Kg/m <sup>3</sup> | دانسیته                          | $\rho$         | عدد موج                | بی بعد                 | n               |
| N/m               | کشش سطحی                         | $\sigma$       | فشار                   | Pa                     | P               |
| Pa                | تنش برشی جداره                   | $\tau_0$       |                        |                        |                 |

### ۱- مقدمه

که رفع آن نیازمند تمهیدات خاص با صرف هزینه‌های سنگین و گزاف است. یکی از مهمترین پدیده‌های طبیعی و ناخواسته، اختلاط آب و هوا و تشکیل جریان دو فازی است. به طور کلی در مبحث سیستم‌های چند فازی سیالی، به جریانی دو فازی گفته می‌شود که مرکب از جریان همزمان یک مایع مانند آب در فاز مایع و یک گاز مانند هوا در فاز گازی باشد [۱]. جریان دو فازی از کلیه قوانین حاکم بر مکانیک سیالات تبعیت می‌کند. سیستم‌های جریان دو فازی به شدت پیچیده‌اند (حتی جریان دو فازی یک‌بعدی در مجاری) و مشخصه‌های زیاد جریان سبب

بعضی اوقات در پروژه‌های مهندسی نظیر سازه‌های هیدرولیکی، جریان آب مقادیر قابل ملاحظه‌ای از هوا را با خود حمل می‌کند. ورود هوا به مجرا می‌تواند نتیجه شکل‌گیری گردابه‌ها در ورودی مجرا باشد. در اثر ورود هوا به مجرا اندرکنش شدیدی بین جریان آبی که از سازه عبور می‌کند و هوایی که در مجاورت آب حرکت می‌کند، پدید می‌آید. گاهی اوقات این اندرکنش اثرات سودمندی ایجاد می‌کند و گاه برعکس، معضلات و پدیده‌های ناخواسته‌ای را نیز به دنبال دارد

نامعینی و پیچیدگی این نوع جریانها در مقایسه با جریانهای تک فاز می‌شود [۲].

در حالت کلی با طبقه‌بندی انواع حالات و توزیع فصل مشترک بین دو فاز مایع و گاز که اصطلاحاً رژیمهای جریان یا الگوهای جریان نامیده می‌شوند، می‌توان به توضیح و تفسیر این نوع جریانها پرداخت. رژیمهای جریان معمولاً توسط موقعیت و شکل هندسی خط لوله، جهت جریان، خواص فیزیکی و شدت جریان هریک از فازها و گاه انتقال دما از دیواره لوله، تحت تأثیر قرار می‌گیرند. الگوهای جریان دو فاز بر اساس توزیع آب و هوا تقسیم‌بندی می‌شوند و عوامل بسیار مهم در این رده‌بندی و تشکیل محدوده وسیعی از جریانات دو فاز با شکل هندسی مختلف و مشخصات هیدرولیکی گوناگون نیروهای جاذبه و کشش سطحی‌اند. لازم به ذکر است که علی‌رغم کوششهای بسیار زیادی که برای طبقه‌بندی انواع رژیمهای جریان دو فاز به عمل آمده است، تمامی این روشها به شدت کیفی و اغلب مطابق نقطه‌نظرات شخصی محققان مختلف‌اند. به طوری که تاکنون رژیمهای مختلفی تعریف شده و دامنه گسترده‌ای از عناوین، برای این منظور مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این الگوها شامل؛ جریان حبابی، جریان تویی یا قالبی، جریان لایه‌ای، جریان موجی، جریان لخته‌ای، جریان حلقوی، جریان قطره‌ای، جریان مه‌آلود و جریان کف‌آلود یا انتقالی‌اند [۳]. به طور کلی مهمترین و پیچیده‌ترین الگوهای محتمل در مجاری افقی و نزدیک به افقی (تونلها و مجاری بسته) رژیمهای لخته‌ای، موجی و چینه‌ای‌اند. به خصوص وقتی طول مجرا زیاد باشد، سایر رژیمها در طول بسیار کوچکی رخ داده و خیلی سریع با انتقال در طول محدودی به رژیمهای اصلی یاد شده تبدیل می‌شوند و حتی در صورت ظهور، عموماً شباهتهای زیادی به سه رژیم یاد شده دارند، به طوری‌که، بسیاری از محققان با توجه به شباهتهای هندسی رؤیت شده، رژیمهای مذکور را جزو یکی از سه رژیم اصلی مزبور می‌دانند.

با استفاده از نتایج آزمایشگاهی، بیکر [۴] با تعریف

متغیرهای جدیدی از مشخصات جریانهای دو فاز، نقشه رژیمهای جریان دو فاز در مجاری افقی را ارائه کرد. گزلی و برگلین [۴] از نتایج آزمایشات بر روی مخلوط آب و هوا در لوله‌های افقی، نموداری برای تعیین الگوهای جریان ارائه دادند. در این نقشه الگوی جریان بر حسب مختصات سرعت ظاهری گاز در مقابل سرعت ظاهری مایع ارائه شده است.

در میان رژیمهای اشاره شده، رژیم لخته‌ای به دلیل افت شدید فشار و ایجاد تنشهای بزرگ در سازه و تولید جریان نوسانی بیش از سایر الگوها باید مورد توجه قرار گیرد. از جمله سازه‌های مستعد برای تشکیل جریان لخته‌ای می‌توان به مجاری بسته متصل به سرریزهای نیلوفری، تخلیه‌کننده‌های تحتانی با کنترل از بالادست، سیستمهای فاضلاب، لوله‌ها و کالورتها با جریان فوق‌بحرانی اشاره کرد. اختلاط و اندرکنش آب و هوا باعث ایجاد تنشهای بزرگ و شرایط جریان نوسانی در سیستمهای هیدرولیکی می‌شود [۵].

مواردی که در آن پتانسیل شکل‌گیری جریان لخته‌ای وجود دارد عبارت‌اند از [۶]:

الف- جریان لخته‌ای در مرحله انتقال بین دو ناحیه پر و نیمه‌پر در محدوده  $0.18 \leq h_1/D \leq 1/5$ ، که  $h_1$  عمق آب در مخزن بالا دست و  $D$  قطر مجرا و یا ارتفاع مجرا (در مقاطع غیر دایره‌ای) است.

ب- در کالورتها با شیب تند ( $S_0 \geq S_c$ ) با ورودی لبه‌گرد، هنگامی که تراز آب مخزن بین  $1/2 \leq h_1/D \leq 1/5$  قرار می‌گیرد (تشکیل جریانهای موجی غلتایی).

ج- در مجاری با جریان فوق‌بحرانی، وقتی که شرایط استغراق، خروجی سیستم را در آستانه تشکیل پرش هیدرولیکی قرار می‌دهد.

کالینسکی و روبرتسون [۷] مطالعاتی در مورد جریان دو فاز آب و هوا در اثر وقوع پرش هیدرولیکی در مجرای نیمه‌پر انجام دادند، ایشان میزان هوای جذب شده توسط پرش هیدرولیکی را به صورت زیر ارائه دادند.

$$\frac{Q_a}{Q_w} = 0.0066(Fr - 1)^{1.4} \quad , \quad Fr = \frac{V_w}{\sqrt{gy_e}} \quad (1)$$

فشار در ارتباط با متغیرهای مختلف و مرزبندی الگوهای جریان در شبیه‌های مختلف است.

## ۲- تحلیل ابعادی و متغیرهای مؤثر

با توجه به تعدد متغیرها و پیچیدگیهای خاص مسئله برای دستیابی به معادلات حاکم بر جریان، استفاده از معادلات تجربی و نیمه تجربی بهترین روش است و برای بسط معادله پایه‌ای برای تعیین فشار و افت آن در مجرا می‌توان از روشهای کلاسیک تحلیل ابعادی استفاده کرد. با توجه به اهمیت انتشار آشفته‌گی و شناوری، فشار بستگی به جاذبه، تنش برشی آشفته‌گی، نیروهای بین سطحی، خواص سیالات (آب و هوا) و مشخصات ابعادی جریان دارد و لذا معادله به صورت زیر بیان می‌شود [۲].

$$P = f(Q_a, V_w, D, L, g, \mu_a, \mu_w, \rho_a, \rho_w, \sigma, \tau_0, \varphi) \quad (2)$$

که در آن P فشار،  $Q_a$  دبی هوا، L مشخصه طولی (طول موج لخته‌ای)، g شتاب ثقل،  $\mu$  لزجت،  $\rho$  دانسیته،  $\sigma$  کشش سطحی،  $\tau_0$  تنش برشی دیواره در مرز تماس دو سیال و  $\varphi$  زاویه مجرا با افق است. زیرنویسهای a و w به ترتیب معرف هوا و آب هستند. با انتخاب  $V_w, D$  و  $\rho_w$  به عنوان متغیرهای تکراری، معادله متغیرهای بی بعد به صورت زیر خواهد بود.

$$\frac{P}{\rho_w V_w^2} = f\left(\frac{Q_a}{V_w D^2}, \frac{\tau_0}{\rho_w V_w^2}, \frac{\sigma}{\rho_w D V_w^2}, \frac{L}{D}, \frac{\rho_a}{\rho_w}, \frac{\mu_a}{\mu_w}, \frac{\mu_w}{\rho_w V_w D}, \frac{gD}{V_w^2}, \sin \varphi\right) \quad (3)$$

و یا

$$\frac{P}{\rho_w V_w^2} = f\left(\frac{Q_a}{Q_w}, \frac{\tau_0}{\rho_w V_w^2}, \frac{\sigma}{\rho_w D V_w^2}, \frac{L}{D}, \frac{\rho_a}{\rho_w}, \frac{\mu_a}{\mu_w}, \frac{\mu_w}{\rho_w V_w D}, \frac{gD}{V_w^2}, \sin \varphi\right) \quad (4)$$

با در نظر گرفتن  $\beta = \frac{Q_a}{Q_w}$ ، غلظت متوسط هوا در مجرا

به صورت  $\bar{C} = \frac{\beta}{1+\beta}$  خواهد بود. همچنین با منظور کردن  $S_0 = \sin \varphi$  و  $K_f = (L/D) f_{TP}$ ،  $h = V_w^2 / 2g$ ،  $P_h = P / \gamma_w$  فشار اعمالی در پیرومتر متصل به کف مجراست)، پس از جاگذاری و ساده‌سازی و اعمال عملیات تشابه ناقص [۱۵]، افت

که Fr عدد فرود،  $Q_a$  مقدار دبی هوای جذب شده و  $y_e$  عمق هیدرولیکی و برابر با  $A/T$  است که در آن A سطح مقطع و T عرض بالای جریان و  $V_w$  سرعت جریان آب است. تأثیر هوا بر مشخصات نوسانی جریان آب و هوا توسط محققان مختلف نظیر آلبرتسون و آندرو [۸]، همام و مک کورکودال [۹] و لی و مک کورکودال [۱۰] مورد بررسی قرار گرفته است. سلیمانی و هانزاتی [۱۱] به بررسی شرایط بحرانی انتقال از جریان چینه‌ای به جریان لخته‌ای پرداختند. ژانگ و همکاران [۱۲] مدل مکانیکی برای پیش‌بینی کسر مایع و انتقال از جریان لخته‌ای به حبابی پراکنده ارائه کردند. زهو و همکاران [۱۳] به بررسی جریان‌ات نوسانی در مرحله پرشدن سریع مجاری افقی مخصوصاً در فاضلاب‌روها پرداختند. عیسی و کمپف [۱۴] با مدلسازی ریاضی و آزمایشگاهی جریان لخته‌ای در مجاری افقی به این نتیجه رسیدند که به حساب آوردن تراکم‌پذیری هوا در بهبود جواب و دستیابی به جوابهای واقعیت‌ر مؤثر است. اگر چه مطالعات زیادی در ارتباط با ناپایداری امواج آب در مجاری بسته صورت گرفته است، لیکن در حال حاضر راهنمای طراحی قابل اعتماد و معیار مناسبی برای پیش‌بینی تأثیرات جریان نوسانی وجود ندارد. بررسی کتابهای مرجع و گزارشات فنی هیدرولیکی نشان می‌دهد که کمبود اطلاعاتی در ارتباط با دامنه خاصی از عمق آب مخزن بالادست ( $h_1$ ) وجود دارد. این دامنه عبارت است از  $h_1/D \leq 1/5$  که  $h_1/D = 1/5$  مرز پایینی شروع جریان تحت فشار و  $h_1/D = 0/8$  مرز بالایی جریان آزاد است. در این دامنه حبابهای هوای محبوس درون جریان آب رها می‌شوند و متعاقب آن نوسانات ناخواسته فشار، می‌تواند باعث خرابی مجرا شده و خسارتهای جبران ناپذیری را به دنبال داشته باشد.

در این مقاله نتایج بررسی آزمایشگاهی جریان دو فازی آب و هوا روی یک مدل آزمایشگاهی تونل تحت فشار ارائه می‌شود. نتایج شامل نوسانات فشار در هر مقطع، تغییرات

فشار در جریان دو فازی به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\frac{P_h}{h} = f(\bar{C}, K_f, \frac{\rho_a}{\rho_w}, \frac{\mu_a}{\mu_w}, Re, Fr, \frac{We}{Fr} \sqrt{1-S_0}) \quad (5)$$

که ضریب افت اصطکاکی دو فازی و  $We$ ،  $Re$  و  $Fr$

به ترتیب اعداد ویر، رینولدز و فرود بوده و به صورت:

$$Fr_c = c/\sqrt{Lg} \quad \text{و} \quad Re_G = GD/\bar{\mu}, \quad We_G = G^2D/\bar{\rho}\sigma$$

تعریف شده‌اند. در ضمن  $\bar{\mu} = \alpha\mu_a + (1-\alpha)\mu_w$  و

$$\bar{\rho} = \alpha\rho_a + (1-\alpha)\rho_w$$

فازی‌اند.

همچنین  $G$  سرعت جرمی (حاصلضرب سرعت در دانسیته سیال)،  $c$  سرعت موج لخته‌ای،  $L$  طول موج لخته‌ای و  $\alpha$  کسر فضای خالی گاز (نسبت حجم گاز در یک طول موج لخته‌ای به حجم کل در طول موج مورد نظر) هستند.

### ۳- مدل آزمایشگاهی و مشخصات آزمایشات

مدل طراحی شده، مطابق شکل (۱) شامل مجرای اصلی

انتقال آب با قطر داخلی ۹ سانتیمتر و طول ۱۰ متر با جداره شفاف است. در طول لوله حدود ۳۰۰ پیژومتر برای اندازه‌گیری

نوسانات فشار نصب شده است، برای این منظور در هر مقطع، تعداد ۷ عدد حسگر فشار (روی زوایای ۰، ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰،

۱۵۰ و ۱۸۰ درجه) مطابق شکل (۲) نصب شده است. مخزن بالادست مخزنی است مکعب مستطیلی که در وسط یکی از

دیواره‌های آن در ارتفاع ۵ سانتیمتری از کف، سوراخی به قطر ۱۰ سانتیمتر برای اتصال مجرا به مخزن تعبیه شده است. آب

ورودی توسط سه سری صفحه مشبک آرام‌کننده، کاملاً آرام شده و سپس وارد مجرا می‌شود. مخزن پایین دست از جنس

پلکسی‌گلاس شفاف بوده و در دیواره انتهایی آن دو شیر خروجی با قابلیت کنترل سطح آب تعبیه شده است. هوای

خروجی از مجرا پس از ورود به این مخزن در محفظه‌ای که در بالای مخزن نصب شده است ذخیره و از مخزن خارج می‌شود.

سایر اجزای مدل شامل مخزن ذخیره برای تأمین آب مورد نیاز، سرریز و مخزن سرریز برای اندازه‌گیری دبی آب، پمپ آب و

کمپرسور هواست.

متغیرهای آزمایش شامل شیب مجرا، دبی هوا، دبی آب و

موقعیتهای طولی و موقعیتهای عمقی سنجش فشار است. برای

اندازه‌گیری و ثبت نوسانات فشار بر جداره مجرای آب بر از

حسگرهای فشار DP15-30 و DP15-34 ساخت Validyne با

قابلیت ۱۰ برداشت در هر ثانیه استفاده شده است. حسگرهای

فشار برای اندازه‌گیری فشارهای پایین و متوسط با دقت

آزمایشگاهی، طراحی شده‌اند. برای برداشت اطلاعات مربوط به

مشخصات موج لخته‌ای نظیر پیروید و تعداد در واحد زمان از

یک دستگاه کرنومتر با دقت صدم ثانیه استفاده شد. 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 با حداقل و

حداکثر دبی قابل اندازه‌گیری ۴۰ و ۴۰۰ لیتر در دقیقه و دقت ۱

لیتر در دقیقه استفاده شده است. برای تعیین دبی آب

همان طور که قبلاً نیز اشاره شد از یک سرریز لبه‌تیز

مثلثی با زاویه رأس ۹۰ درجه و مانومتر با دقت ۰/۱

میلیمتر استفاده شد. هد آب در مخازن بالادست و پایین

دست با استفاده از خط‌کش و اشل با دقت ۱ میلیمتر تعیین شد.

طول لخته با نصب خط‌کش و اشل روی لوله و عکسبرداری

تعیین شد.

یکی از مهمترین عوامل در برداشت نوسانات

فشار، مدت زمان برداشت هر حالت است. محققان مختلف

زمانهای برداشت متفاوتی از ۳۰ ثانیه تا چندین

ساعت برای ثبت و ضبط نوسانات فشار به کار

برده‌اند. برخی معتقدند که انتخاب زمان برداشت

بزرگتر منجر به ثبت فشارهای حداکثر بزرگتری خواهد

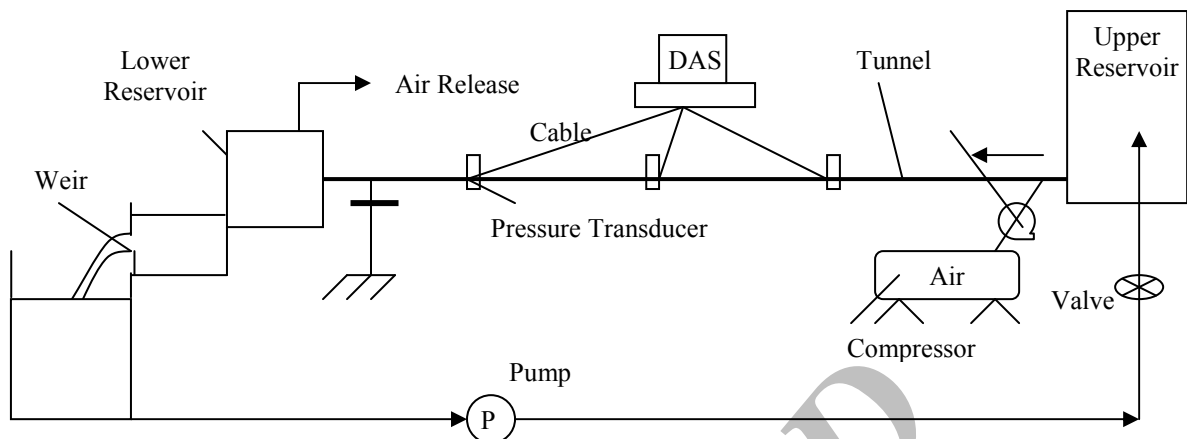
شد. و برخی اظهار می‌کنند که زمان در نظر گرفته شده برای

ثبت نوسانات فشار باید کمتر از ۶۰ ثانیه باشد. بنابراین مدت

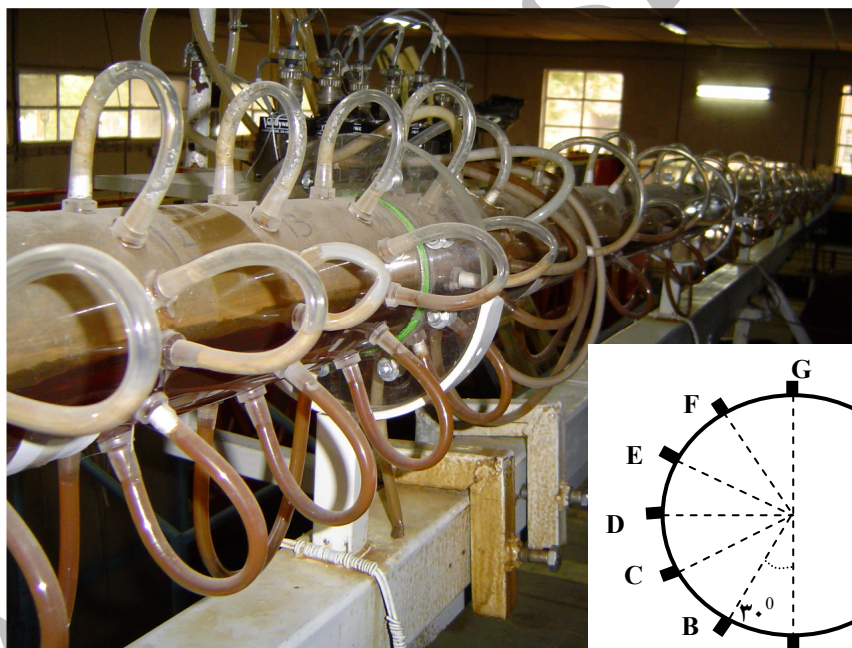
زمان لازم برای ثبت نوسانات فشار بحث پیچیده‌ای است. در

این تحقیق با استفاده از تحلیل آماری واریانس یکطرفه [۱۶]،

مدت زمان لازم برای ثبت اطلاعات ۱۵۰ ثانیه انتخاب شد. برای



شکل ۱- شمای کلی بخشهای مختلف مدل آزمایشگاهی



شکل ۲- وضعیت آرایش پیزومترهای متصل به حسگرها

آورده شده است.

#### ۴- نتایج

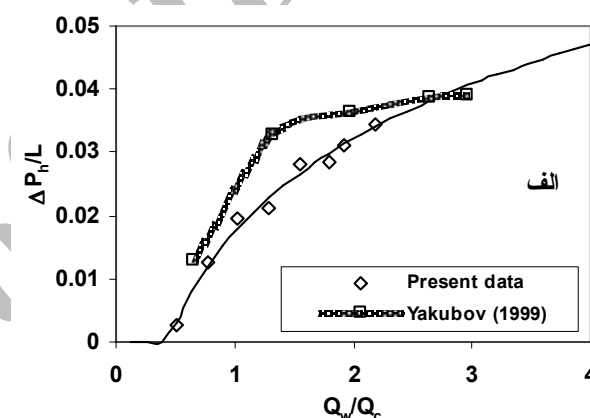
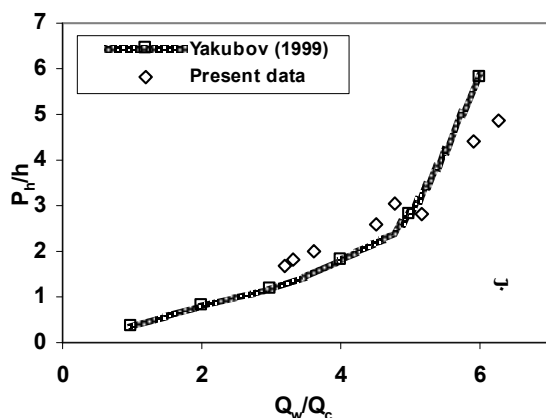
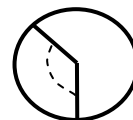
برای اطمینان از صحت آزمایشات و داده‌های برداشت شده، ابتدا نتایج به دست آمده با نتایج محققان پیشین مقایسه می‌شود. در شکل (۳-الف) تغییرات افت فشار بر حسب دبی

واسنجی حسگرهای فشار، در تحقیق حاضر از ستونهای مدرج آب به ابعاد  $50 \times 4 \times 4$  سانتیمتر در هدهای استاتیکی مختلف استفاده شده است.

جدول (۱) برنامه کلی آزمایشات انجام شده و اطلاعات برداشت شده را نشان می‌دهد. در مجموع ۴۵۵ آزمایش و ۲۷۳۰ برداشت انجام شده است. اطلاعات بیشتر در مرجع [۱۷]

جدول ۱- برنامه کلی آزمایشات انجام شده و اطلاعات برداشت شده

| زمان ثبت اطلاعات | موقعیتهای برداشت در یک مقطع (درجه) | موقعیتهای اندازه گیری فشار (متر)        | دبی آب (Lit/sec) | دبی هوا (Lit/min)  | شیب مجرا (درصد)   |
|------------------|------------------------------------|---|------------------|--|-------------------|
| حداقل ۳ دقیقه    | ۰ و ۳۰ و ۶۰ و ۹۰ و ۱۲۰ و ۱۵۰ و ۱۸۰ | ۱/۶۱ و ۲/۸۲ و ۴/۰۲ و ۵/۲۲ و ۷/۱۲ و ۸/۹۲ | ۲۰-۴             | ۶۷ و ۱۰۰ و ۱۲۰ و ۱۵۰ و ۱۸۰ و ۲۱۰ و ۲۴۰ و ۲۷۰ و ۳۰۰ و ۳۳۰ و ۴۰۰ | ۰/۵ و ۰/۲ و ۳ و ۴ |

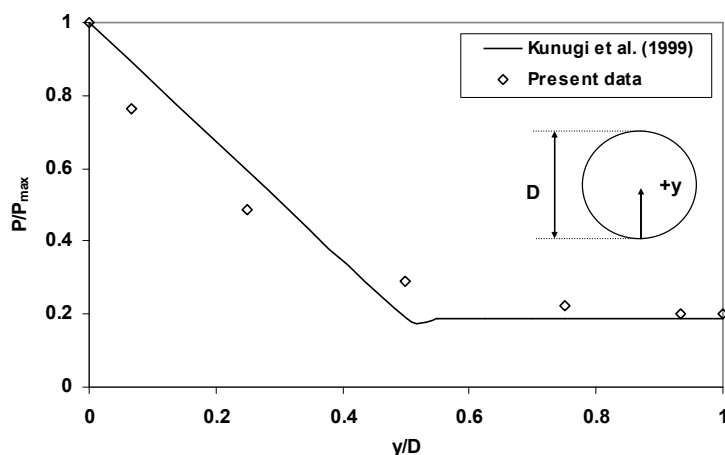


شکل ۳- مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق و [۱۸]: الف) افت فشار بر حسب دبی آب، ب) فشار متوسط نرمالایز شده بر حسب دبی آب ( $Q_a=2 \text{ lit/sec}$ )

لزجت به راحتی قابل اغماض نبوده و می توانند بر نتایج تأثیرگذار باشند، در حالی که مدل حاضر دارای قطر داخلی ۹ سانتیمتر بوده و بالطبع تأثیر کشش سطحی و به خصوص لزجت کمتر است.

شکل (۴) تغییرات فشار نسبی در یک مقطع را نسبت به عمق نشان می دهد در این شکل فشار در هر عمق به ماکزیمم فشار اعمال شده در همان مقطع تقسیم شده است تا نتایج قابل مقایسه شود. اطلاعات ارائه شده نتایج حاصل از این تحقیق و نتایج آزمایشگاهی کونوگی و همکاران [۱۹] است. با دقت در این شکل نزدیکی نتایج و رفتار یکسان منحنیها قابل توجه است.

آب با نتایج یکوبف و همکاران [۱۸] مقایسه شده است. مجرای مورد استفاده توسط این مرجع دارای قطر داخلی ۲/۵۴ سانتیمتر و طول ۳/۵ متر است. در این شکل متغیر بدون بعد  $Q_w/Q_c$  و  $Q_c=V_c A_p$  و  $(V_c=(gD)^{0.5})$  مورد استفاده قرار گرفته است تا معیار مناسبی برای مقایسه ایجاد شود. در شکل (ب-۳) فشار متوسط نرمالایز شده با استفاده از مدل آزمایشگاهی حاضر و اطلاعات مرجع معرفی شده مورد مقایسه قرار گرفته است. علی رغم اختلاف بین نتایج، رفتار نزدیک منحنیها بیانگر صحت روش برداشت اطلاعات است. لازم به ذکر است که در قطر ۲/۵۴ سانتیمتر تأثیرات کشش سطحی و



شکل ۴- مقایسه نتایج حاصل از این تحقیق و نتایج [۱۹]

می‌کند. در ضمن ملاحظه می‌شود که با افزایش شیب به مرور رژیم از حالت لخته‌ای به سمت موجی و چینه‌ای تمایل پیدا می‌کند. شکل (۶) نمونه‌ای از جریان لخته‌ای رخ داده در مجرا را در مراحل آزمایش نشان می‌دهد.

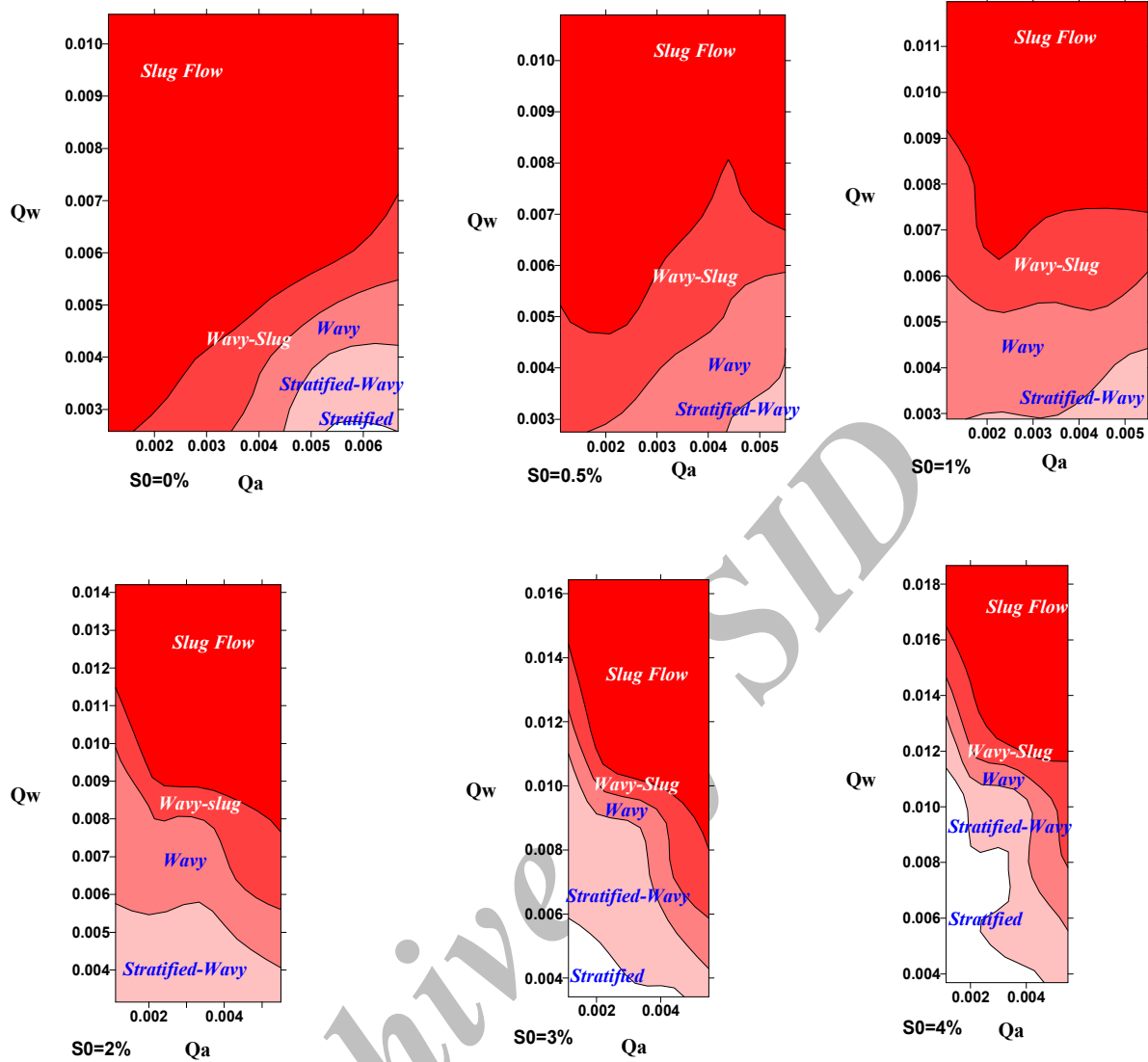
شکل (۷) منحنیهای نوسانات فشار را در یک مقطع در موقعیتهای زاویه‌ای مختلف، شکل (۲)، نشان می‌دهد. شرایط هندسی و هیدرولیکی مربوط به این شکل عبارت‌اند از؛ دبی هوا و آب به ترتیب ۱/۱۱۷ و ۴/۷۴ لیتر بر ثانیه، شیب مجرا صفر، موقعیت طولی ۱/۱۶ متر از مخزن بالا دست و عمق آب در مخزن بالا دست برابر ۳۳/۷ سانتیمتر است (علت اینکه  $h/D$  برابر ۳/۷۴ شده است، این است که در این مرحله از آزمایشات، هوا با استفاده از کمپرسور تزریق شده است). در این شکل نوسانات شدید فشار در مجرا را می‌توان ملاحظه کرد. همچنین ملاحظه می‌شود که در دو پیرومتر فوقانی یعنی زوایای ۱۵۰ و ۱۸۰ درجه فشارهای منفی نیز اتفاق می‌افتند. در صورت استفاده از سریهای زمانی برای تقریب نوسانات فشار اعمالی بر سازه در پیرومتر A (تراز کف لوله)، می‌توان معادله زیر را به دست آورد.

$$f(t) = K_n + 0.755 \sum_{n=1}^{\infty} \left[ H + \frac{H}{2\pi K_{n-1}} \sin(\pi K_{n-1}) \cos\left(\frac{2\pi K_{n-1} t}{T}\right) \right]$$

$$K_n = H + \frac{H}{2n\pi} \cos\left(\frac{2n\pi t}{T}\right) \quad (6)$$

پس از بررسی و مقایسه نتایج تحقیق حاضر و نتایج محققان پیشین و اطمینان از صحت نتایج، به بررسی کاملتر نتایج اخذ شده در این تحقیق برای دستیابی به اهداف مورد نظر پرداخته می‌شود. با توجه به اینکه در میان رژیمهای معرفی شده، رژیم جریان لخته‌ای ناپایدارترین رژیم جریان دو فازی است و در صورت وقوع، نوسانات شدید فشار در مجرا به وجود می‌آیند، قبل از هر چیز باید حدود هیدرولیکی وقوع این نوع رژیم جریان شناخته شود. شکل (۵) نقشه‌الگوهای جریان محتمل در تونلها و مجاری با قطر زیاد را بر اساس دبیهای هوا و آب در شیبهای مختلف با استفاده از نتایج مدل آزمایشگاهی نمایش می‌دهد. برای دستیابی به این شکل، اطلاعات برداشت شده با استفاده از دوربین دیجیتال بر اساس سه رژیم مورد بحث (چینه‌ای، موجی و لخته‌ای) در دبیهای مختلف هوا و آب کدگذاری شده و سپس اطلاعات وارد نرم افزار Winsurf شد. اطلاعات وارد شده پس از تجزیه و تحلیلهای انجام شده توسط نرم افزار به صورت شکل (۵) درآمده است. ملاحظه می‌شود که در شیب صفر، در محدوده کمی از نقشه، جریان چینه‌ای وجود دارد اما با افزایش شیب در نسبت دبی هوا به آب ثابت، ضمن اینکه منحنیهای همتراز از نظر صعود و نزول تغییر جهت می‌دهند و به مرور، جریان چینه‌ای حذف می‌شود و مجدداً در شیبهای زیاد در جهتی کاملاً متفاوت شکل گرفته و رشد

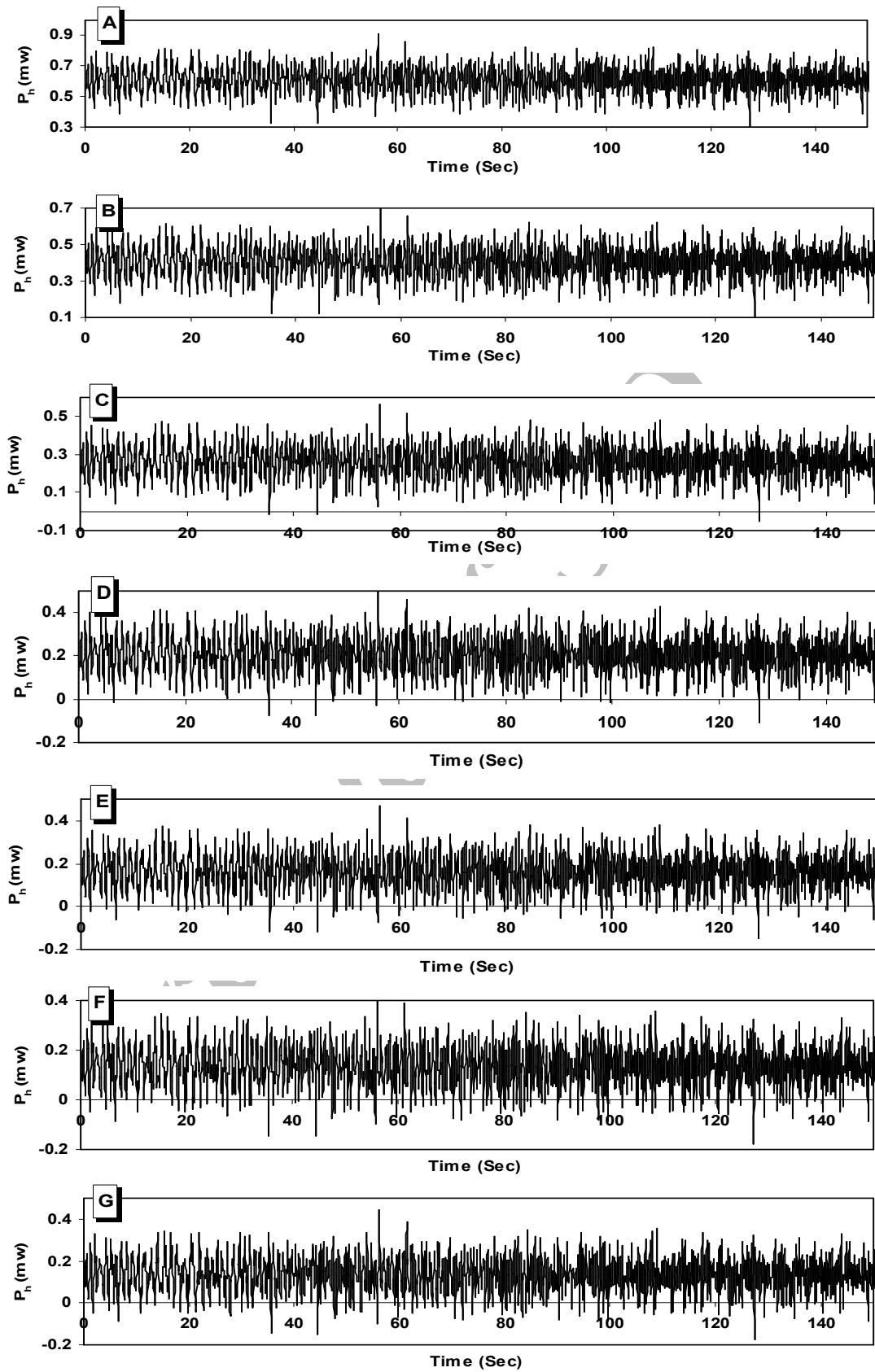




شکل ۵- نقشه الگوهای جریان محتمل در تونلها و مجاری با قطر زیاد برای شیبهای مختلف (دییها بر حسب متر مکعب بر ثانیه هستند).



شکل ۶- نمونه‌ای از لخته تشکیل شده در مجرا



شکل ۷- منحنیهای نوسانات فشار در یک مقطع در موقعیتهای زاویه‌ای مختلف

که  $T$  و  $H$  به ترتیب پیرو و ارتفاع لخته‌اند. به عنوان مثال برای شرایط مربوط به شکل (۷)  $T=1/81$  ثانیه و  $H=907$  میلی‌متر بوده است. برای تعیین سری زمانی نوسانات فشار از فرمولهای اوایلر استفاده شده است. به این ترتیب که فرض می‌شود، تابع  $f(t)$  تابعی دوره‌ای با دوره تناوب  $2\pi$  باشد و بتوان آن را به صورت سری مثلثاتی بسط داد. با استفاده از بسط سریهای زمانی فوریه و با فرض  $f(t)=H/2$ ، (یعنی مقدار تابع برابر مقدار میانگین فرض شده است)، سری زمانی فوق تعیین شده است. نتایج اندازه‌گیریهای انجام شده و بسط سری زمانی در شکل (۸) ارائه شده‌اند.

شکل (۹) تغییرات نوسانات متوسط فشار را در یک مقطع در موقعیتهای زاویه‌ای مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در پیرومتر کف بیشترین فشارها اعمال می‌شود و نوسانات فشار به صورت غیرخطی کاهش می‌یابند و در دو پیرومتر بالایی که بیشتر از دیگر پیرومترها در تماس با هوا هستند تقریباً فشارها برابرند. بر مبنای این روش، نهایتاً منحنیهای توپولوژی که وضعیت نوسانات فشار متوسط در مجرا را نشان می‌دهند تهیه شده است، شکل (۱۰). در این شکل ملاحظه می‌شود که وقوع این پدیده دارای اثر کوبشی (شلاقی) است به نحوی که بیشترین کوبش (نوسان فشار) در کف رخ می‌دهد و هنگامی که عمق نسبت به موقعیت صفر افزایش می‌یابد، دیواره تحت نوسانات فشار کمتری قرار می‌گیرد.

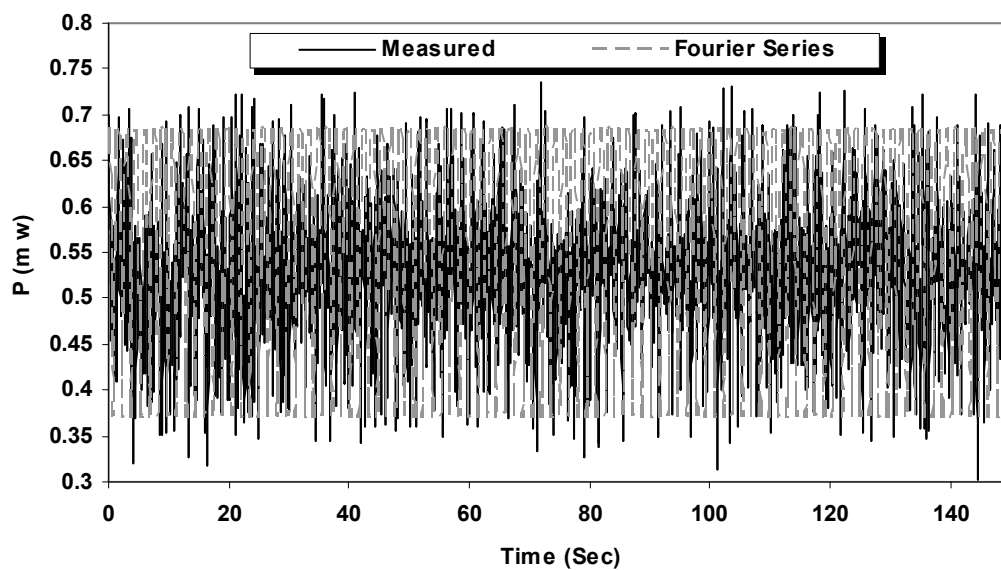
شکل (۱۱) مقایسه‌ای بین ماکزیمم، مینیمم و متوسط فشارهای اعمالی بر لوله در موقعیتهای زاویه‌ای مختلف (عمق آب در مخزن بالادست  $0/295$  متر بوده است) را ارائه می‌کند. ملاحظه می‌شود که ماکزیمم فشار در شرایطی که شیب مجرا صفر، دبی هوا  $67$  لیتر بر دقیقه و دبی آب  $270$  لیتر بر دقیقه است حدوداً  $2/5$  برابر هد آب بالادست است و لذا سیستم لوله یا تونل بایستی قادر باشد شوک فشار متوسط تا حدود  $2/5h_1$  و گاه بیشتر از این مقدار را تحمل کند و لذا بایستی طراح در صورت پیش‌بینی وقوع این پدیده ناخواسته،

تعمیادات لازم را برای پایدار سازی سازه تونل مخصوصاً در ورودی پیش‌بینی کند.

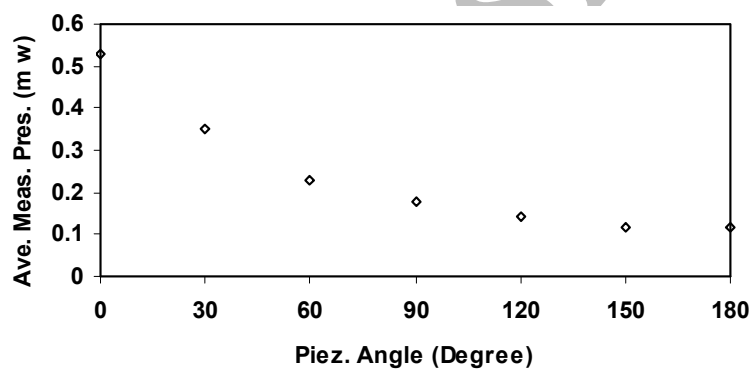
شکل (۱۲) تغییرات  $P_f/h$  بر حسب غلظت متوسط را در شبیه‌های مختلف نشان می‌دهد. با ملاحظه این شکل می‌توان دریافت که در تمامی نمودارها ابتدا فشار متوسط با افزایش غلظت متوسط افزایش می‌یابد و سپس مجدداً پس از عبور از یک مقدار ماکزیمم (در مقدار مشخص غلظت متوسط)، کاهش می‌یابد. در این شرایط در شیب صفر بازای غلظت متوسط برابر  $0/5$  و در شیب  $4$  درصد به ازای غلظت متوسط برابر  $0/42$ ، فشار متوسط به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد. در سایر شبیه‌ها مقدار غلظت متوسط که به ازای آن فشار متوسط، ماکزیمم است بین  $0/42$  و  $0/5$  قرار دارد. در ضمن حداکثر مقدار فشار نرمالایز شده نسبت به هد هیدرواستاتیکی، در شیب صفر حدود  $2/7$  و در شیب  $4$  درصد حدود  $3/9$  است. برای بررسی تأثیر ضریب فشار (ضریب اصطکاک دو فاز،  $1/2f_{TP}$ )، ضریب اصطکاک دو فاز طبق معادله بلاسیوس به صورت زیر مورد استفاده قرار گرفت.

$$f_{TP} = 0.079 \left( \frac{GD}{\mu} \right)^{-0.25} \quad (7)$$

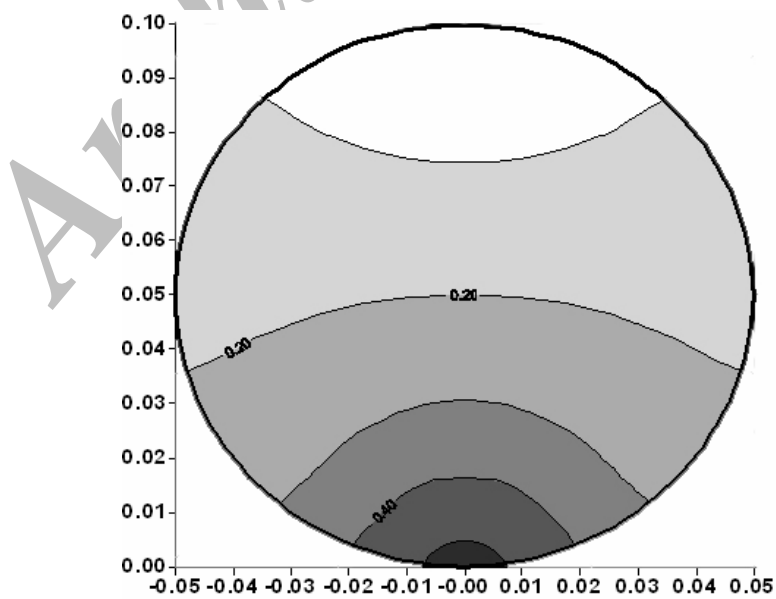
شکل (۱۳)، تغییرات  $P_f/h$  را بر حسب  $K_f$  نمایش می‌دهد. در این شکل می‌توان دریافت که فشار متوسط بر حسب  $K_f$  به صورت درجه دو تغییر می‌یابد و با افزایش  $K_f$  تا حد معینی فشار متوسط، افزایش می‌یابد اما پس از عبور از یک اوج، با افزایش  $K_f$  مجدداً فشار متوسط کاهش می‌یابد. همچنین مقدار ماکزیمم در تمام شبیه‌ها در  $K_f$  حدود  $200$ ، اتفاق می‌افتد و ماکزیمم منحنیها از  $2/7$  در شیب صفر تا  $3/9$  در شیب  $4$  درصد تغییر می‌کند. شکل (۱۴) تغییرات فشار متوسط را بر حسب عدد رینولدز دو فاز  $(Re_G)$  در شبیه‌های مختلف نمایش می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که ارتباط معنی داری بین فشار متوسط و عدد رینولدز دو فاز وجود ندارد. البته طبق نظر بسیاری از محققان [۲۰] هنگامی که در یک آبیگر به طور



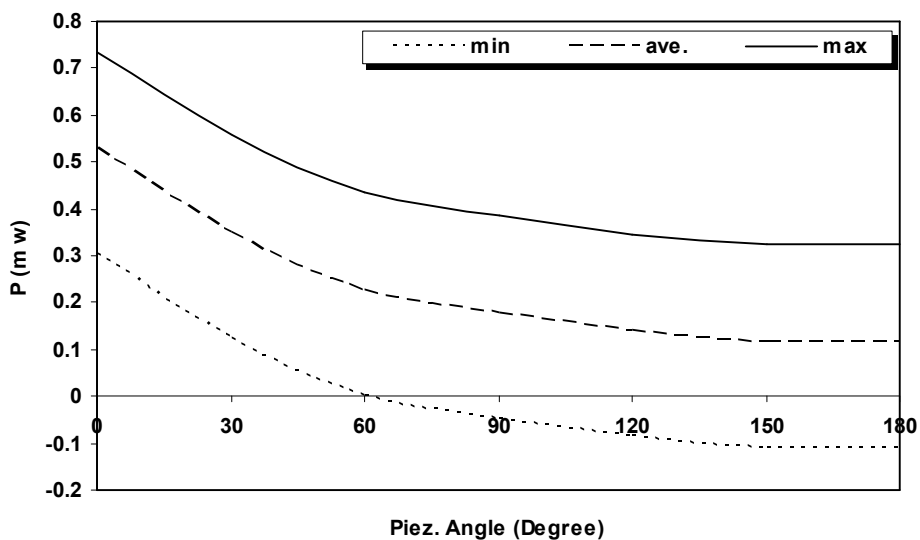
شکل ۸- مقایسه نتایج اندازه‌گیری‌های انجام شده و نتایج حاصل از بسط سری زمانی



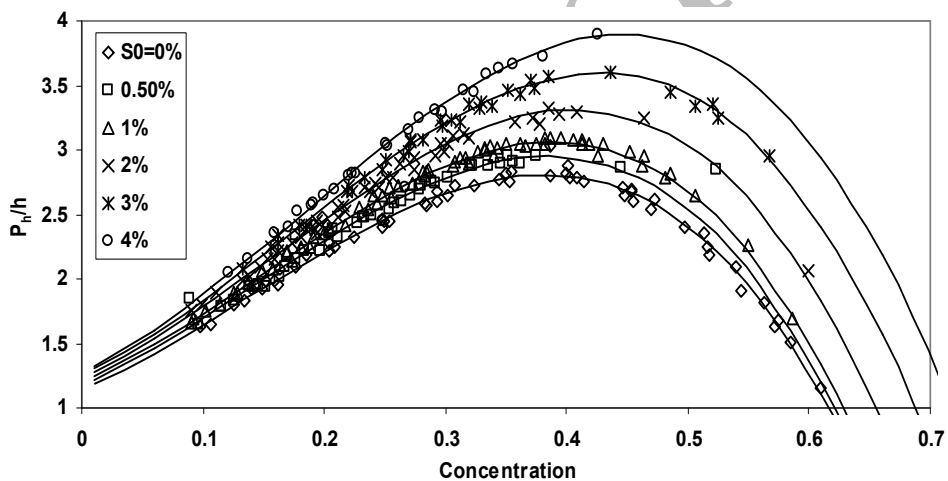
شکل ۹- تغییرات نوسانات متوسط فشار در یک مقطع در موقعیتهای زاویه‌ای مختلف



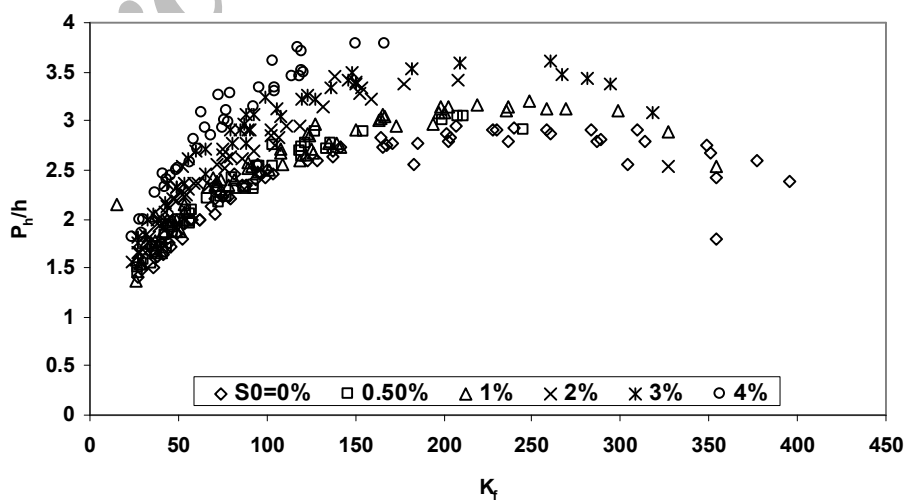
شکل ۱۰- نمونه‌ای از منحنیهای توپوگرافی نوسانات فشار متوسط در مجرا



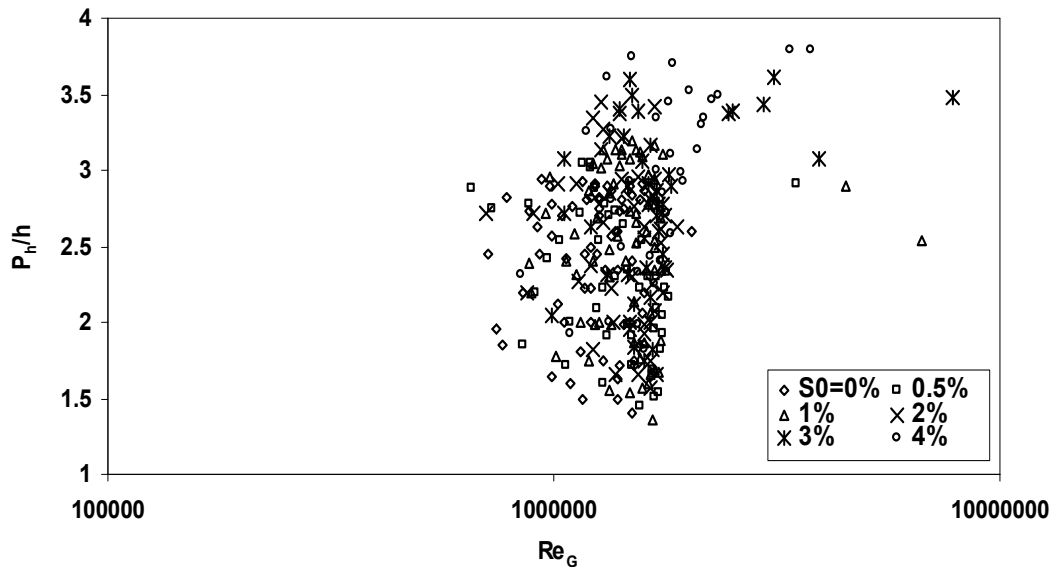
شکل ۱۱- مقایسهٔ ماکزیمم، مینیمم و متوسط فشارهای اعمالی بر لوله در موقعیتهای زاویه‌ای مختلف



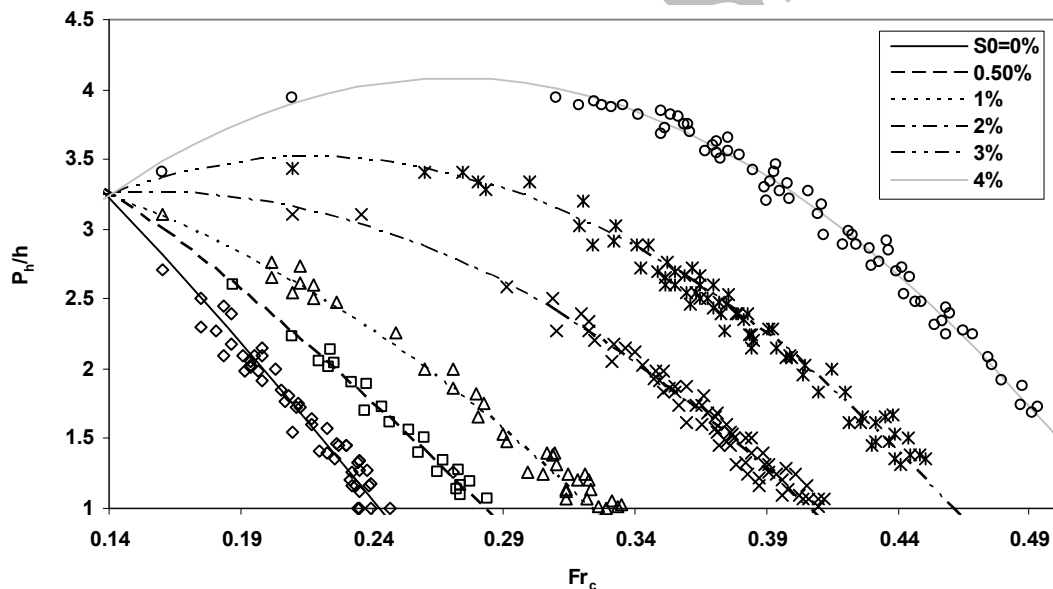
شکل ۱۲- تغییرات  $P_{II}/h$  بر حسب غلظت متوسط در شیبه‌های مختلف



شکل ۱۳- تغییرات فشار متوسط بر حسب  $K_f$



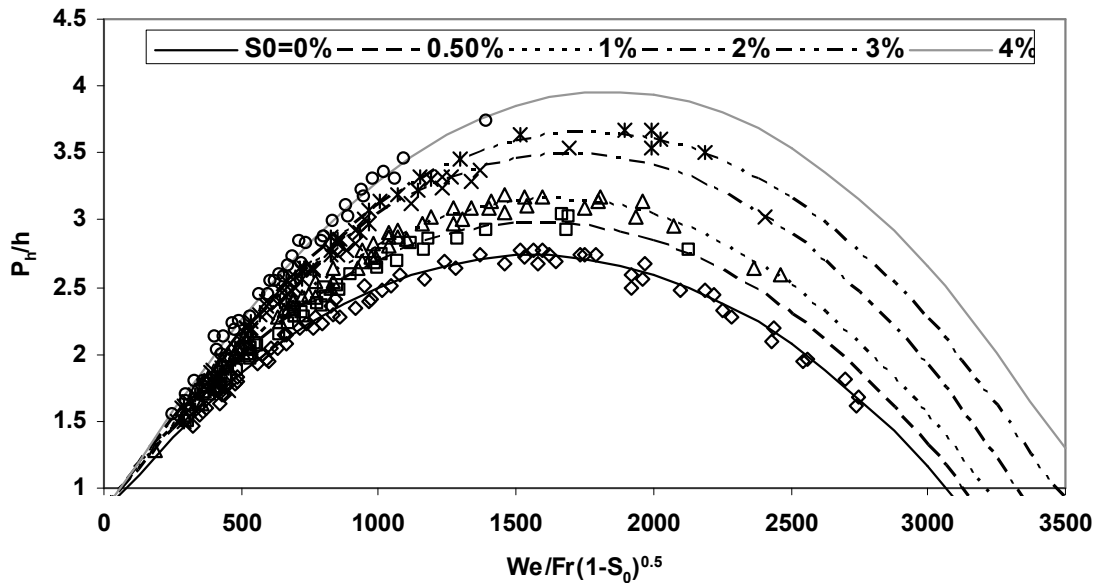
شکل ۱۴- تغییرات فشار متوسط بر حسب عدد رینولدز دو فازی



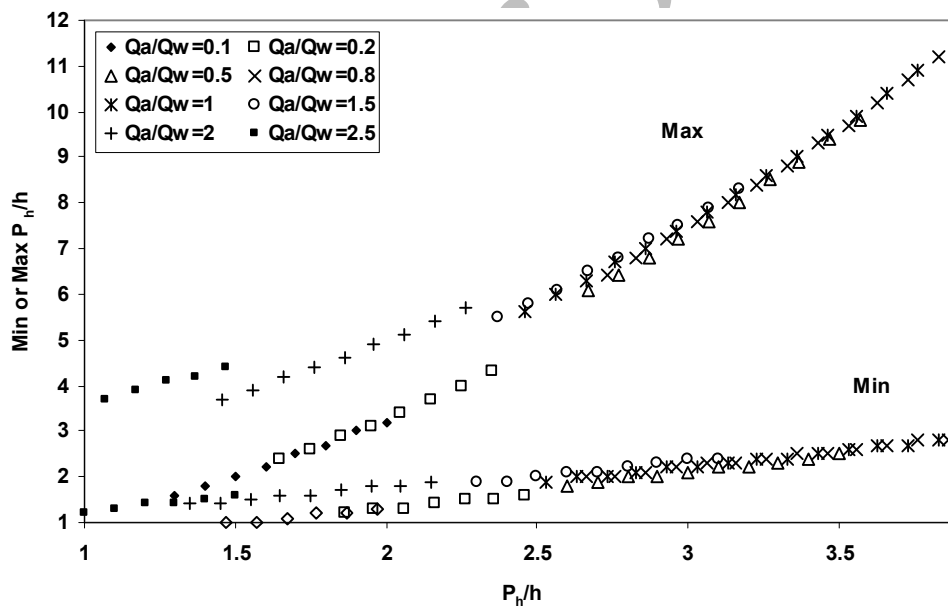
شکل ۱۵- تغییرات  $P_h/h$  بر حسب عدد فرود موج لخته‌ای در شیبهای مختلف

فشار افزایش و سپس کاهش می‌یابد. شکل (۱۶) تغییرات  $P_h/h$  را بر حسب  $wfs$  در شیبهای مختلف نشان می‌دهد، که در آن  $wfs$  برابر با  $We/Fr(1-S_0)^{0.5}$  است. ملاحظه می‌شود که، در حدود ۱۷۰۰، در تمامی شیبها مقدار فشار متوسط به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد. این ماکزیمم از حدود ۲/۷ در شیب صفر تا حدود ۳/۹ در شیب ۴ درصد تغییر می‌کند. در بخشهای قبل ارتباط فشار متوسط و متغیرهای بی‌بعد

متوسط عدد رینولدز از ۳۰۰۰۰ بیشتر می‌شود، تأثیر لزجت سیال ناچیز است. شکل (۱۵)، تغییرات  $P_h/h$  بر حسب عدد فرود موج لخته‌ای را در شیبهای مختلف نشان می‌دهد. با ملاحظه این شکل می‌توان دریافت که در عدد فرود برابر ۰/۱۴ فشار در تمامی شیبها برابر است و با افزایش عدد فرود نسبت به ۰/۱۴، به جز در شیبهای ۳ و ۴ درصد، فشار کاهش می‌یابد. در شیبهای ۳ و ۴ درصد با افزایش عدد فرود موج لخته‌ای، ابتدا



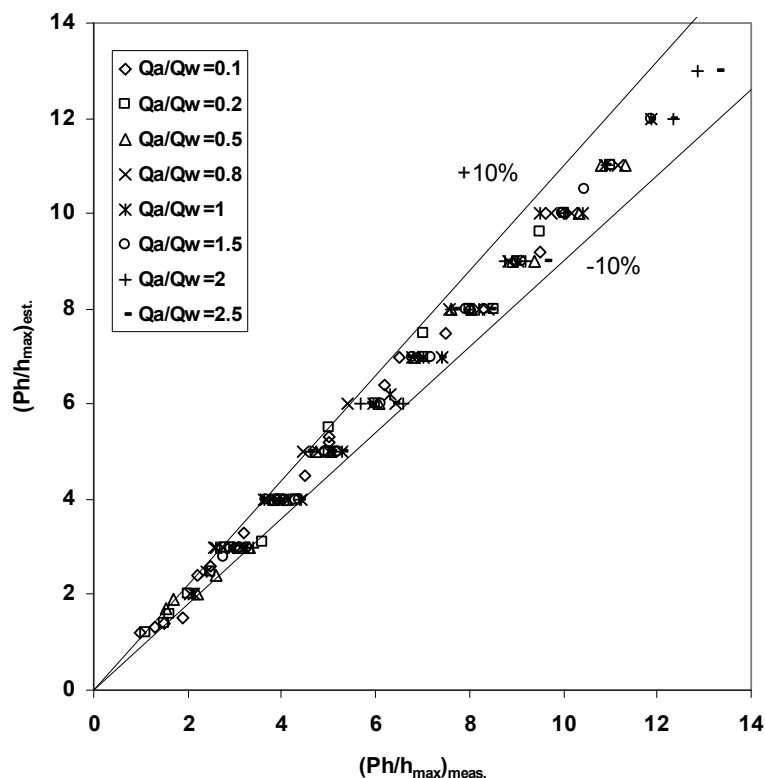
شکل ۱۶- تغییرات فشار متوسط بر حسب wfs در شیبهای مختلف



شکل ۱۷- تغییرات مقادیر نرمالایز شده ماکزیمم و مینیمم فشار بر حسب متوسط فشار در نسبت دبیهای مختلف آب و هوا

شکل (۱۷) تغییرات مقادیر نرمالایز شده ماکزیمم و مینیمم فشار را بر حسب متوسط فشار در نسبت دبیهای مختلف آب و هوا ( $Q_a/Q_w$ ) نشان می‌دهد. در این صورت با بهره‌گیری از این شکل می‌توان ارتباط مقادیر نرمالایز شده ماکزیمم و مینیمم فشار را بر حسب متوسط فشار در نسبت دبیهای مختلف آب و

موجود در معادله (۵) ارائه شد. برای تعیین فشار متوسط بر حسب متغیرهای اشاره شده، معادلاتی در مرجع [۲۱] ارائه شده است. از این رو در این مقاله ارتباط مقادیر نوسانی ماکزیمم و مینیمم فشار با متوسط فشارها و نسبت دبی هوا و آب در شیبهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۱۸- مقایسه نتایج اندازه‌گیری و نتایج تخمینی با استفاده از معادله (۸)

هوا به صورت زیر پیشنهاد داد.

$$\left(\frac{P_h}{h}\right)_{\max} = 0.6e^{-4.8S_0} \left( 1.2\left(\frac{P_h}{h}\right)^2 + 2.4\left(\frac{Q_a}{Q_w}\right)^{0.75} \right) \quad (8)$$

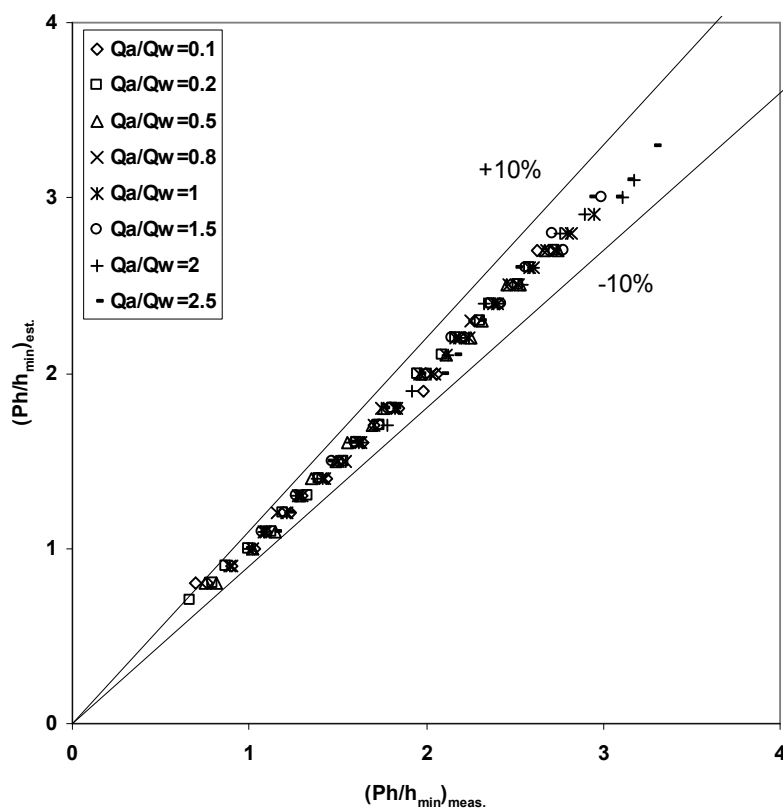
$$\left(\frac{P_h}{h}\right)_{\min} = 0.6e^{1.25S_0} \left( 0.95\left(\frac{P_h}{h}\right)^{1.1} + 0.45\left(\frac{Q_a}{Q_w}\right)^{0.85} \right) \quad (9)$$

### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله نتایج بررسی انجام شده بر روی نوسانات فشار در مدل آزمایشگاهی جریان دو فازی آب و هوا در تونلها و مجاری تحت فشار ارائه شده است. آزمایشات در شبیهای صفر تا ۴ درصد که متداولترین شبیهای مورد استفاده در تونلهای آب هستند انجام شده است. تجزیه و تحلیل نتایج نشان می‌دهد که جریان ناپایدار آب و هوا در صورت وقوع، تنشهای دینامیکی شدیدی بر سازه اعمال می‌کند، به نحوی که گاه متوسط فشار اعمالی به سازه به حدود ۴ و حداکثر فشار اعمالی به سازه به حدود ۱۰ برابر حد استاتیکی می‌رسد، ضمن اینکه بیشترین ضربات بر کف تونل اعمال می‌شوند و دیواره‌ها از تأثیر ضربه‌ای کمتری برخوردارند، شکلهای (۱۰) و (۱۱). در ضمن، برای تعیین مقادیر ماکزیمم و مینیمم فشار معادلات (۸) و (۹) پیشنهاد می‌شود. باید توجه داشت که این پدیده ناخواسته به شدت ضربانی است و لذا بایستی در صورت پیش‌بینی احتمال وقوع، مخصوصاً در ناحیه ورودی تونل تمهیدات لازم

شکلهای (۱۸) و (۱۹) نتایج تخمینی با استفاده از معادلات (۸) و (۹) و نتایج حاصل از مدل آزمایشگاهی را مقایسه می‌کند. ملاحظه می‌شود که اطلاعات تخمینی و اندازه‌گیری شده در محدوده  $\pm 10\%$  قرار دارند و همسازي بسیار خوبی بین نتایج تخمینی و اندازه‌گیری شده وجود دارد. طبق شکلهای (۱۲) تا (۱۶)، مقدار میانگین فشار به اعداد بی‌بعد معادله (۵) نسبت داده شد، بنابراین می‌توان برای تعیین ارتباط متغیرهای مورد بررسی و مقادیر ماکزیمم و مینیمم از معادلات (۸) و (۹) استفاده کرد.





شکل ۱۹- مقایسه نتایج اندازه گیری و نتایج تخمینی با استفاده از معادله (۹)

### قدردانی

بدین وسیله از مساعدتهای مالی معاونت امور پژوهشی سازمان مدیریت منابع آب ایران و معاونت تحصیلات تکمیلی دانشگاه صنعتی شریف تقدیر و تشکر به عمل می آید.

اعمال شود. البته شناخت کاملتر این پدیده نیازمند بررسیهای بیشتر است که این مطلب موضوع کار ادامه دار محققان این پروژه است.

### مراجع

- Martin, C. S., "Entrapped Air in Pipelines," *Proc. of the 2<sup>nd</sup> Int. Conf. on Pressure Surges*, BHRA Fluid Eng., London, September 22-24, 1976.
- Falvey, H. T., "Air-Water Flow in Hydraulic Structures," *Eng. Monograph*, No. 41, US Department of the Interior, Water and Power Resources Service, 1980.
- Levy, S., *Two-Phase Flow in Complex Systems*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1999.
- Collier, J. G., *Convective Boiling and Condensation*, 3<sup>rd</sup> Edit., Clarendon Press, Oxford, 1996.
- Hahn, U., "Safe Operation of Closed Conduit Systems at Slug Flow Condition," *Wasserbau und Wasserwirtschaft*, No.75, Technische Universitat Munchen, pp. 68-93, 1995.
- USBR, *Design of Small Canal Structures*, Bureau of Reclamation. United States Department of the Interior, Denver, Colorado, 1978.
- Kalinske, A. A., and Robertson, J. M., "Closed Conduit Flow," *Trans. Am. Soc. of Civil Eng. (ASCE)*, Vol.108, pp.1435-1516, 1943.
- Albertson, M. L., and Andrews, J.S., "Transients Caused by Air Release, in Control of Flow in Closed Conduits," (J.P.Tullis, ed.), Colorado State University, Fort Collins. Colorado, pp.315-340, 1971.

9. Hamam, M. A., and McCorquodale, J. A., "Transient Conditions in the Transition from Gravity to Surcharged Sewer Flow," *Canadian Journal of Civil Engineering*, Vol.9, No.2, pp.189-196, 1982.
10. Li, J., and McCorquodale, J. A., "Modeling Mixed Flow in Storm Sewers." *J. Hyd. Eng.* Vol. 125, No.11, pp.1170-1179, 1999.
11. Soleimani, A., and Hanratty, T. J. "Critical Liquid Flows for the Transition from the Pseudo-Slug and Stratified Patterns to Slug Flow," *Int. J. Multiphase Flow* 29, pp.51-67, 2003.
12. Zhang, H. Q., Sarica, W. Q. C., and Brill, P. J., "A Unified Mechanistic Model for Slug Liquid Holdup and Transition Between Slug and Dispersed Bubble Flows," *Int. J. Multiphase Flow* 29, pp.97-107, 2003.
13. Zhou, F., Hicks, F., and Steffler, P., "Effects of Trapped Air During Rapid Filling of Partially Full Pipes," Annual Conference of the Canadian Society for Civil Eng. Canada, 2002.
14. Issa, R. I., and Kempf, M. H. W. "Simulation of Slug Flow in Horizontal and Nearly Horizontal Pipes with the Two-Fluid Model," *Int. J. Multiphase Flow* 29, pp.69-95, 2003.
15. Barenblatt, G. I., *Similarity, Self-Similarity and Intermediate Asymptotics*, Consultants Burea, New York, 1979.
16. Freund, J. E., and Walpole, R. E., *Mathematical Statistics*, Third Edition, Prentice Hall, 1980.
۱۷. کبیری سامانی، ع.، مدلسازی تئوری و آزمایشگاهی جریان دو فاز آب و هوا در تونلهای آببر، رساله دکتر، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی عمران، ۱۳۸۴.
18. Yakubov, B., Tanny, J., Maron, D. M., and Brauner, N., "Experimental Study on the Characteristics of a Fluidized Bed in Inclined Pipes," *Proc. of 2<sup>nd</sup> Inter. Symp. On Two-Phase Flow Modeling and Experimentation, Italy*, pp.1825-1832, 1999.
19. Kunugi, T., Sasaki, S., and Ose, Y., "Direct Simulation on Wave Formation and Breaking of Turbulent Flow." *Proc. Of 2<sup>nd</sup> Inter. Symp. On Two-Phase Flow Modeling and Experimentation, Italy*, pp.819-826, 1999.
20. Zielinski, P. B., and Willemonte, J. R., "Effect of Viscosity on Vortex-Orifice Flow," *J. Hydr. Div.*, ASCE, Vol.94, No. 3, 1968.
21. Kabiri-Samani, A. R., Borghei, S. M., and Saidi, M. H., "Fluctuation of Air-Water Two-Phase Flow in Horizontal and Inclined Water Pipelines," Submitted to *Int. J. Multiphase Flow*, Jan., 2005.

Archive of SID