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

عبدالرضا کبیری سامانی*، سید محمود برقعی** 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 تحت‌فشار نظیر تونلهای آب‌بر 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 سازهٔ تونل و تأسیسات جانبی ایجاد کند. در این مقاله نتایج آزمایشات انجام شده روی مدل آزمایشگاهی تونل تحت‌فشار 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 روابطی‌اند 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. Borgheie 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***

* – دانشجوی دکترا ** – دانشیار

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.5.0]

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

$\overline{C}$	غلظت متوسط هوا در مجرا	بی بعد	P_h	فشار متوسط بر حسب ارتفاع ستون آب	Pa
c	سرعت موج لخته‌ای	m/s	Q	دبی	m^3/s
D	قطر مجرا	m	Re	عدد رینولدز	بی بعد
Fr	عدد فرود	بی بعد	T	پریود موج لخته‌ای	s
Fr_c	عدد فرود موج لخته‌ای	بی بعد	t	زمان	s
f	تابع	بی بعد	V_w	سرعت آب	m/s
f_{TP}	ضریب اصطکاک دو فازی	بی بعد	We	عدد وبر	بی بعد
G	سرعت جرمی دو فازی	$kg/(m^2.s)$	y_e	عمق هیدرولیکی	m
g	شتاب ثقل	m/s^2	α	کسر فضای خالی گاز	بی بعد
H	ارتفاع موج لخته‌ای	m	β	نسبت دبی هوا و آب	بی بعد
h_1	عمق آب در مخزن بالادست	m	S_0 ،φ	شیب مجرا	بی بعد
L	مشخصهٔ طولی	m	μ	لزجت	Pa.s
n	عدد موج	بی بعد	ρ	دانسیته	Kg/m^3
P	فشار	Pa	σ	کشش سطحی	N/m
			τ_0	تنش برشی جداره	Pa

۱- مقدمه

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 نتیجهٔ 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 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

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.5.0]

نامعینی و پیچیدگی این نوع جریانها در مقایسه با جریانهای تک فازی 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 دیوارهٔ لوله، تحت تأثیر قرار می‌گیرند. الگوهای جریان دو فازی بر اساس توزیع آب و هوا تقسیم‌بندی می‌شوند و عوامل بسیار مهم در این رده‌بندی و تشکیل محدودهٔ وسیعی از جریانات دو فازی 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 فازی 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 دامنهٔ گسترده‌ای از عناوین، برای این منظور مورد استفاده قرار گرفته‌اند. این الگوها شامل؛ جریان حبابی، جریان توپی 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 [٤] با تعریف متغیرهای جدیدی از مشخصات جریانهای دو فازی، نقشهٔ رژیمهای جریان دو فازی در مجاری افقی را ارائه کرد. گزلی و برگلین [٤] 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 بستهٔ 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[٥].

مواردی که در آن پتانسیل شکل‌گیری جریان لخته‌ای وجود دارد عبارت‌اند از[٦]:

الف- جریان لخته‌ای در مرحلهٔ انتقال بین دو ناحیه پر و نیمه‌پر در محدودهٔ $۰/۸ \le h_1/D \le ۱/۵$، که h_1 عمق آب در مخزن بالا دست و D قطر مجرا ویا ارتفاع مجرا (در مقاطع غیر دایره‌ای) است.

ب- در کالورتهای با شیب تند ($S_0 \ge S_c$) با ورودی لبه‌گرد، هنگامی که تراز آب مخزن بین $۱/۲ \le h_1/D \le ۱/۵$ قرار می‌گیرد (تشکیل جریانهای موجی غلتابی).

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

کالینسکی و روبرتسون [۷] مطالعاتی در مورد جریان دو فازی 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.

$$\frac{Q_a}{Q_w} = 0.0066(Fr-1)^{1.4} \quad , \quad Fr = \frac{V_w}{\sqrt{g y_e}} \qquad (۱)$$

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.5.0]

که Fr عدد فرود، Q_a مقدار دبی هوای جذب شده وy_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 مک‌کورکودال[۹] و لی و مک‌کورکودال[۱۰] مورد بررسی قرار گرفته است. سلیمانی و هانراتی [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 مرحلهٔ پرشدن سریع مجاری افقی مخصوصاً در فاضلابروها پرداختند. عیسی و کمپف [۱٤] 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 دامنهٔ خاصی از عمق آب مخزن بالادست (h_1) وجود دارد. این دامنه عبارت است از ۰/۸≤ h_1/D≤۱/۵ که h_1/D=۱/۵ مرز پایینی شروع جریان تحت‌فشار و h_1/D=۰/۸ مرز بالایی جریان آزاد است. در این دامنه حبابهای هوای محبوس درون جریان آب رها می‌شوند و متعاقب آن نوسانات ناخواستهٔ 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 ارتباط با متغیرهای مختلف و مرزبندی الگوهای جریان در شیبهای 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 نیمه‌تجربی بهترین روش است و برای بسط معادلهٔ پایه‌ای برای تعیین فشار و افت آن در مجرا می‌توان از روشهای کلاسیک تحلیل ابعادی استفاده کرد. با توجه به اهمیت انتشار آشفتگی و شناوری، فشار بستگی به جاذبه، تنش برشی آشفتگی، نیروهای بین‌سطحی، خواص سیالات (آب و هوا) و مشخصات ابعادی جریان دارد و لذا معادله به صورت زیر بیان می‌شود[۲].

$$P = f(Q_a, V_w, D, L, g, \mu_a, \mu_w, \rho_a, \rho_w, \sigma, \tau_0, \varphi) \qquad (۲)$$

که در آن P فشار، Q_a دبی هوا،L مشخصهٔ طولی (طول موج لخته‌ای)، g شتاب ثقل ، μ لزجت، ρ دانسیته، σ کشش سطحی، τ_0 تنش برشی دیواره در مرز تماس دو سیال و φ زاویه مجرا با افق است. زیرنویسهای a و w به ترتیب معرف هوا و آب هستند. با انتخاب V_w، D و ρ_w به عنوان متغیرهای تکراری، معادلهٔ متغیرهای بی‌بعد به صورت زیر خواهد بود.

$$\frac{P}{\rho_w V_w^2} = f\left(\frac{Q_a}{V_w D^2}, \frac{\tau_0}{\rho_w V_w^2}, \frac{\sigma}{\rho_w D V_w^2}, \frac{L}{D}, \frac{\rho_a}{\rho_w}, \frac{\mu_a}{\mu_w}, \frac{\mu_w}{\rho_w V_w D}, \frac{gD}{V_w^2}, \sin\varphi\right) \qquad (۳)$$

و یا

$$\frac{P}{\rho_w V_w^2} = f\left(\frac{Q_a}{Q_w}, \frac{\tau_0}{\rho_w V_w^2}, \frac{\sigma}{\rho_w D V_w^2}, \frac{L}{D}, \frac{\rho_a}{\rho_w}, \frac{\mu_a}{\mu_w}, \frac{\mu_w}{\rho_w V_w D}, \frac{gD}{V_w^2}, \sin\varphi\right) \qquad (٤)$$

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

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.5.0]

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

$$\frac{P_h}{h} = f(\overline{C}, K_f, \frac{\rho_a}{\rho_w}, \frac{\mu_a}{\mu_w}, Re, Fr, \frac{We}{Fr}\sqrt{1-S_0}) \qquad (۵)$$

که f_{TP} ضریب افت اصطکاکی دو فازی و We، Re و Fr به ترتیب اعداد وبر، رینولدز و فرود بوده و به صورت؛ $We_G = G^2D/\overline{\rho}\sigma$ ، $Re_G = GD/\overline{\mu}$ و $Fr_c = c/\sqrt{Lg}$ تعریف شده‌اند. در ضمن $\overline{\mu} = \alpha\mu_a + (1-\alpha)\mu_w$ و $\overline{\rho} = \alpha\rho_a + (1-\alpha)\rho_w$ به ترتیب لزجت و دانسیتهٔ متوسط دو فازی‌اند.

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

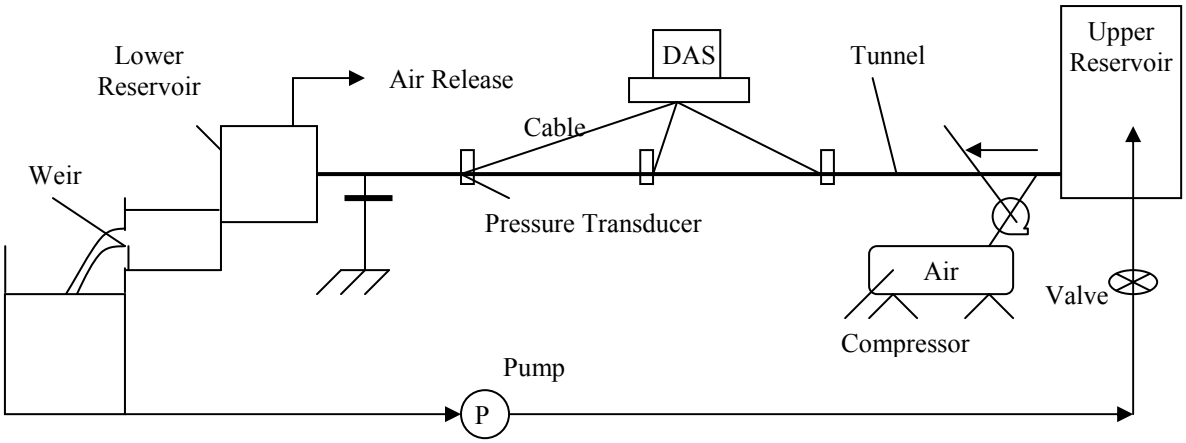
۳- مدل آزمایشگاهی و مشخصات آزمایشات

مدل طراحی شده، مطابق شکل (۱) شامل مجرای اصلی انتقال آب با قطر داخلی ۹ سانتیمتر و طول ۱۰ متر با جدارهٔ شفاف است. در طول لوله حدود ۳۰۰ پیزومتر برای اندازه‌گیری نوسانات فشار نصب شده است، برای این منظور در هر مقطع، تعداد ۷ عدد حسگر فشار (روی زوایای ۰، ۳۰، ٦۰، 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 صفحهٔ مشبک آرام‌کننده، کاملاً آرام شده و سپس وارد مجرا می‌شود. مخزن پایین‌دست از جنس پلکسی‌گلاس شفاف بوده و در دیوارهٔ 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.

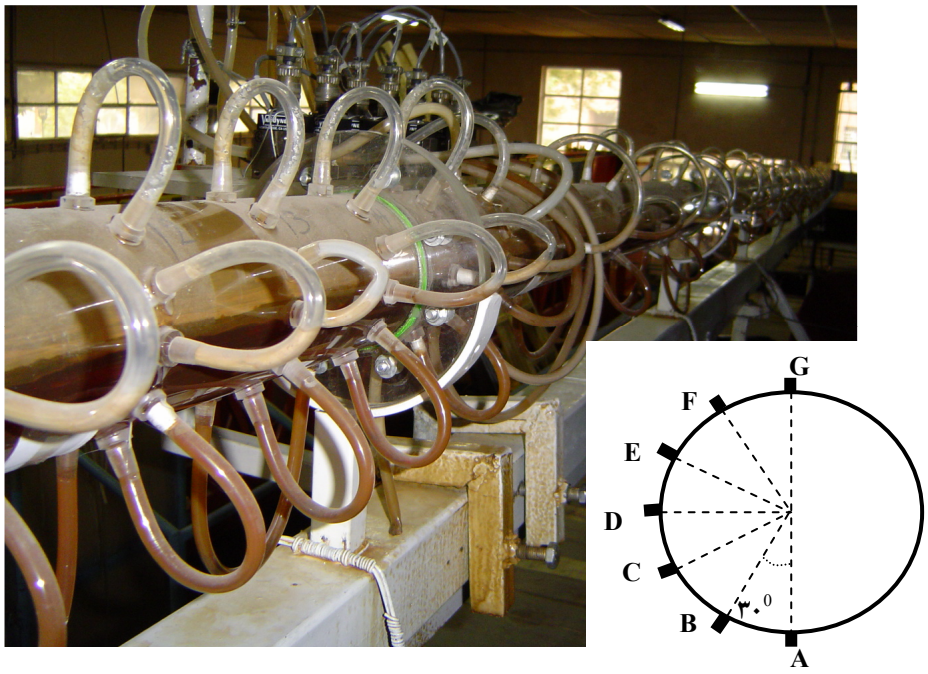
متغیرهای آزمایش شامل شیب مجرا، دبی هوا، دبی آب و موقعیتهای طولی و موقعیتهای عمقی سنجش فشار است. برای اندازه‌گیری و ثبت نوسانات فشار بر جدارهٔ مجرای آب بر از حسگرهای فشار DP15-30 و DP15-34 ساخت Validyne با قابلیت ۱۰ برداشت در هر ثانیه استفاده شده است. حسگرهای فشار برای اندازه‌گیری فشارهای پایین و متوسط با دقت آزمایشگاهی، طراحی شده‌اند. برای برداشت اطلاعات مربوط به مشخصات موج لخته‌ای نظیر پریود 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 ٤۰ و ٤۰۰ 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 زاویهٔ 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 ٦۰ ثانیه باشد. بنابراین مدت زمان لازم برای ثبت نوسانات فشار بحث پیچیده‌ای است. در این تحقیق با استفاده از تحلیل آماری واریانس یکطرفه [۱٦]، مدت زمان لازم برای ثبت اطلاعات ۱۵۰ ثانیه انتخاب شد. برای

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.5.0]



شکل ۱- شمای کلی بخشهای مختلف مدل آزمایشگاهی



شکل ۲- وضعیت آرایش پیزومترهای متصل به حسگرها

واسنجی حسگرهای فشار، در تحقیق حاضر از ستونهای مدرج آب به ابعاد ٤×٤×٥٠ سانتیمتر در هدهای استاتیکی مختلف استفاده شده است.

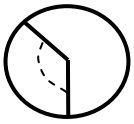
جدول (۱) برنامهٔ کلی آزمایشات انجام شده و اطلاعات برداشت شده را نشان می‌دهد. در مجموع ٤٥٥ آزمایش و ۲۷۳۰ برداشت انجام شده است. اطلاعات بیشتر در مرجع [۱۷] آورده شده است.

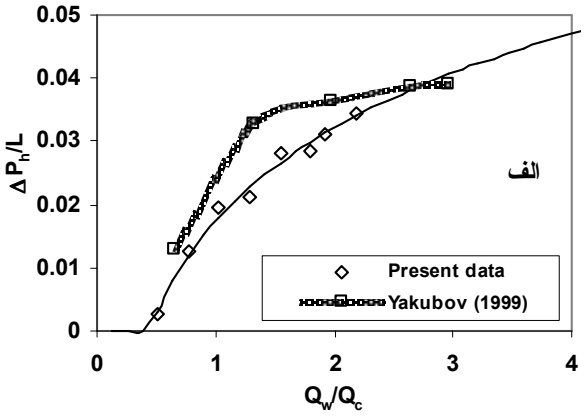
۴- نتایج

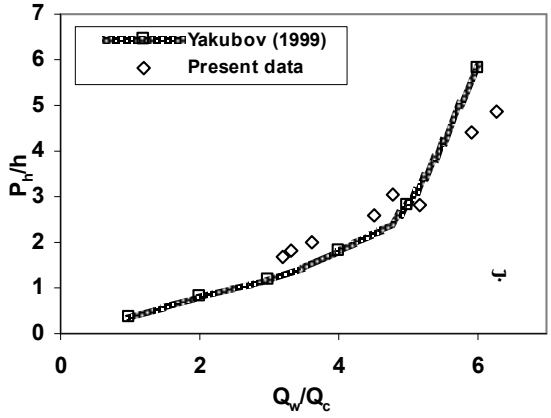
برای اطمینان از صحت آزمایشات و داده‌های برداشت شده، ابتدا نتایج به دست آمده با نتایج محققان پیشین مقایسه می‌شود. در شکل (۳- الف) تغییرات افت فشار بر حسب دبی

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.5.0]

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

زمان ثبت اطلاعات	موقعیتهای برداشت در یک مقطع (درجه)	موقعیتهای اندازه‌گیری فشار (متر)	دبی آب (Lit/sec)	دبی هوا (Lit/min)	شیب مجرا(درصد)
حداقل ۳ دقیقه	۰و ۳۰ و ۶۰ و ۹۰ و ۱۲۰ و ۱۵۰و ۱۸۰ 	۱/۶۱و۲/۸۲و ٤/۰۲و۵/۲۲و ۷/۱۲و۸/۹۲	۲۰-٤	٦۷و۱۰۰و ۱۲۰و۱۵۰و ۱۸۰و۲۱۰و ۲٤۰و۲۷۰و ۳۰۰و۳۳۰و ۳٦۰و٤۰۰	۰و۰/۵و۱و۲ و۳و٤



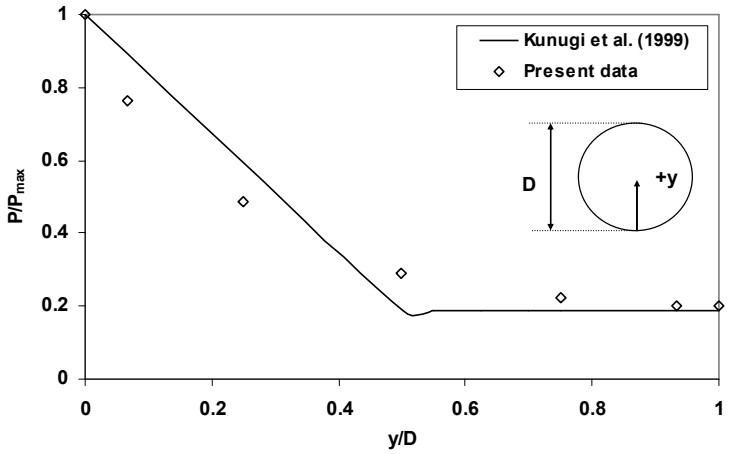


شکل ۳- مقایسهٔ نتایج حاصل از این تحقیق و [۱۸]؛ الف) افت فشار بر حسب دبی آب، ب) فشار متوسط نرمالایز شده بر حسب دبی آب (Q_a=2 lit/sec)

آب با نتایج یکوبف و همکاران [۱۸] مقایسه شده است. مجرای مورد استفاده توسط این مرجع دارای قطر داخلی ۲/٥٤ سانتیمتر و طول ۳/۵ متر است. در این شکل متغیر بدون بعد Q_w/Q_c ($Q_c=V_cA_p$ 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. علی‌رغم اختلاف بین نتایج، رفتار نزدیک منحنیها بیانگر صحت روش برداشت اطلاعات است. لازم به ذکر است که در قطر ۲/٥٤ سانتیمتر تأثیرات کشش‌سطحی و لزجت به راحتی قابل اغماض نبوده و می‌توانند 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 (٤) تغییرات فشار نسبی در یک مقطع را نسبت به عمق نشان می‌دهد 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.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.5.0]



شکل ٤- مقایسهٔ نتایج حاصل از این تحقیق و نتایج [۱۹]

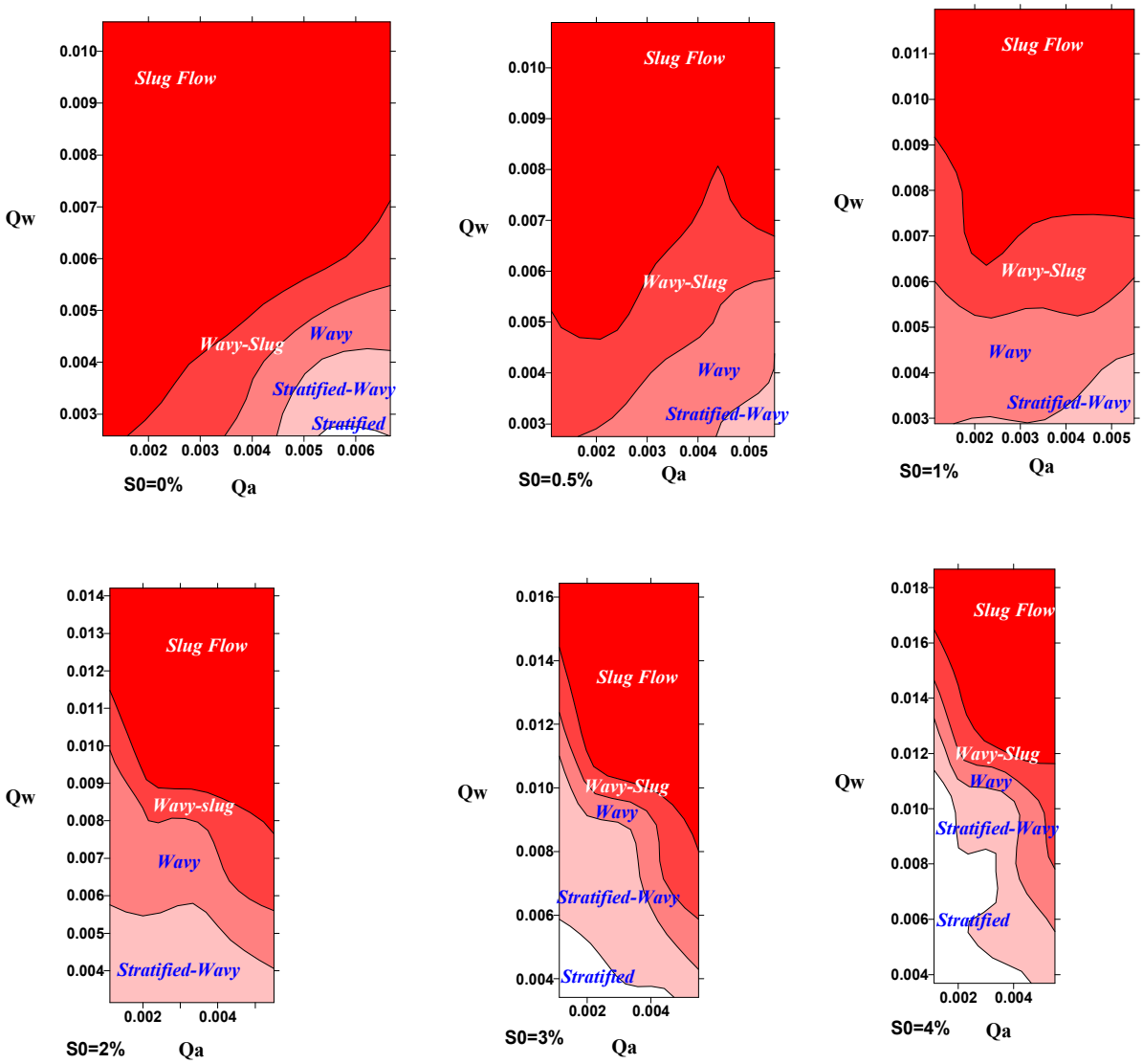
پس از بررسی و مقایسهٔ نتایج تحقیق حاضر و نتایج محققان پیشین و اطمینان از صحت نتایج، به بررسی کاملتر نتایج اخذ شده در این تحقیق برای دستیابی به اهداف مورد نظر پرداخته می‌شود. با توجه به اینکه در میان رژیمهای معرفی شده، رژیم جریان لخته‌ای ناپایدارترین رژیم جریان دو فازی است و در صورت وقوع، نوسانات شدید فشار در مجرا به وجود می‌آیند، قبل از هر چیز باید حدود هیدرولیکی وقوع این نوع رژیم جریان شناخته شود. شکل (٥) نقشهٔ الگوهای جریان محتمل در تونلها و مجاری با قطر زیاد را بر اساس دبیهای هوا وآب 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 (٥) درآمده است. ملاحظه می‌شود که در شیب صفر، در محدودهٔ 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 می‌کند. در ضمن ملاحظه می‌شود که با افزایش شیب به مرور رژیم از حالت لخته‌ای به سمت موجی و چینه‌ای تمایل پیدا می‌کند. شکل (٦) 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 ٤/۷٤ لیتر بر ثانیه، شیب مجرا صفر، موقعیت طولی ۱/۱٦ متر از مخزن بالا دست و عمق آب در مخزن بالا دست برابر ۳۳/۷ سانتیمتر است(علت اینکه h/D برابر ۳/۷٤ 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 پیزومتر 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 پیزومتر A (تراز کف لوله)، می‌توان معادلهٔ زیر را به دست آورد.

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

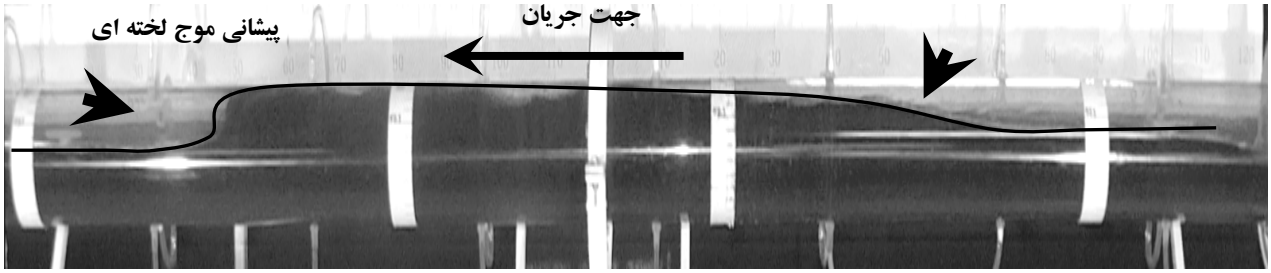
$$K_n = H + \frac{H}{2n\pi}\cos(\frac{2n\pi t}{T}) \qquad (٦)$$

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.5.0]



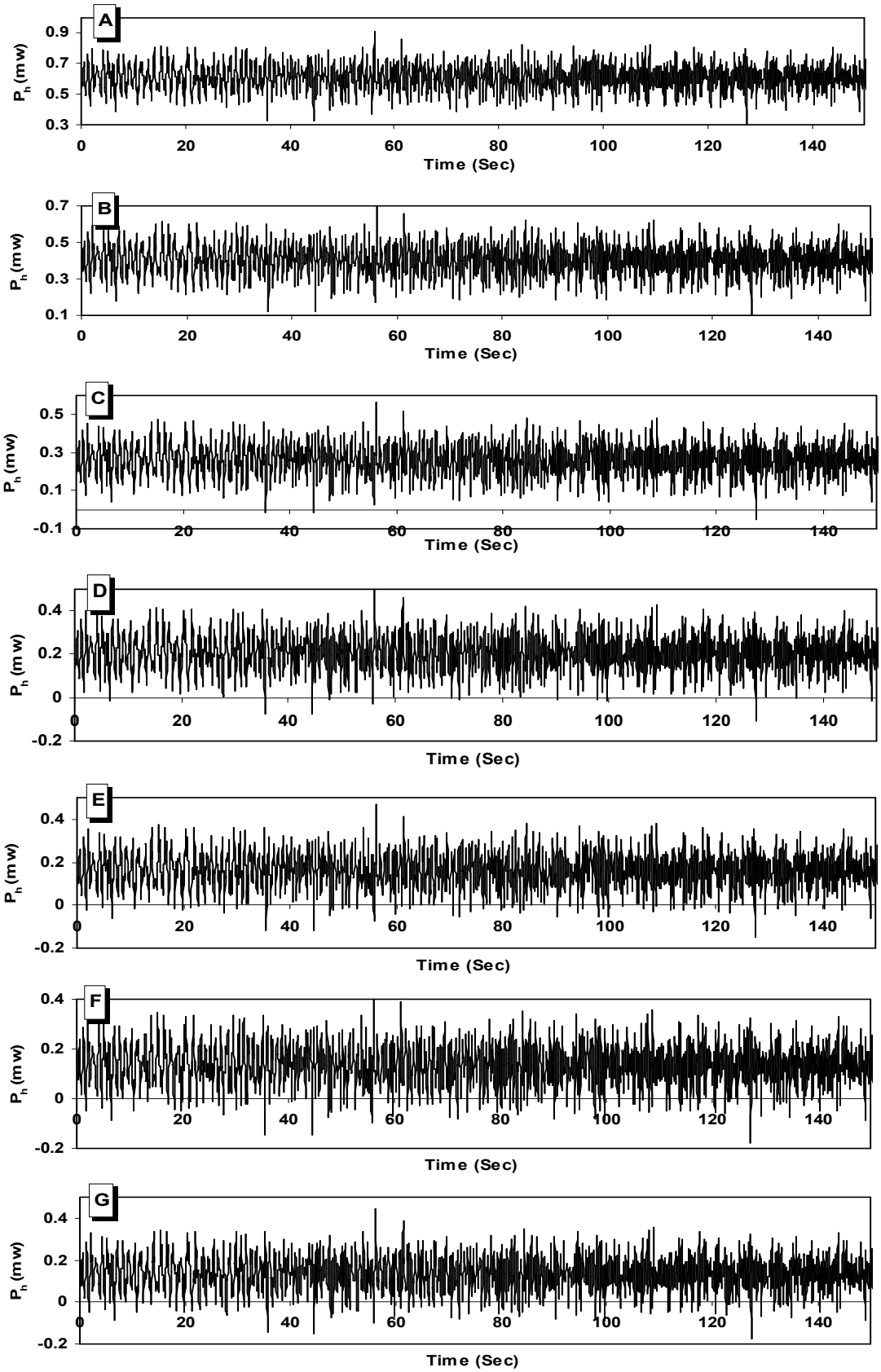
شکل ۵- نقشهٔ الگوهای جریان محتمل در تونلها و مجاری با قطر زیاد برای شیبهای مختلف

(دبیها بر حسب متر مکعب بر ثانیه هستند.)



شکل ٦- نمونه‌ای از لختهٔ تشکیل شده در مجرا

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.5.0]



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

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.5.0]

که T و H به‌ترتیب پریود و ارتفاع لخته‌اند. به عنوان مثال برای شرایط مربوط به شکل (۷) T=۱/۸۱ ثانیه و H=۹۰۷ میلیمتر بوده‌است. برای تعیین سری زمانی نوسانات فشار از فرمولهای اویلر استفاده شده است. به این ترتیب که فرض می‌شود، تابع f(t) تابعی دوره‌ای با دورهٔ تناوب 2π 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. همان طور که ملاحظه می‌شود در پیزومتر کف بیشترین فشارها اعمال می‌شود و نوسانات فشار به صورت غیرخطی کاهش می‌یابند و در دو پیزومتر بالایی که بیشتر از دیگر پیزومترها 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.

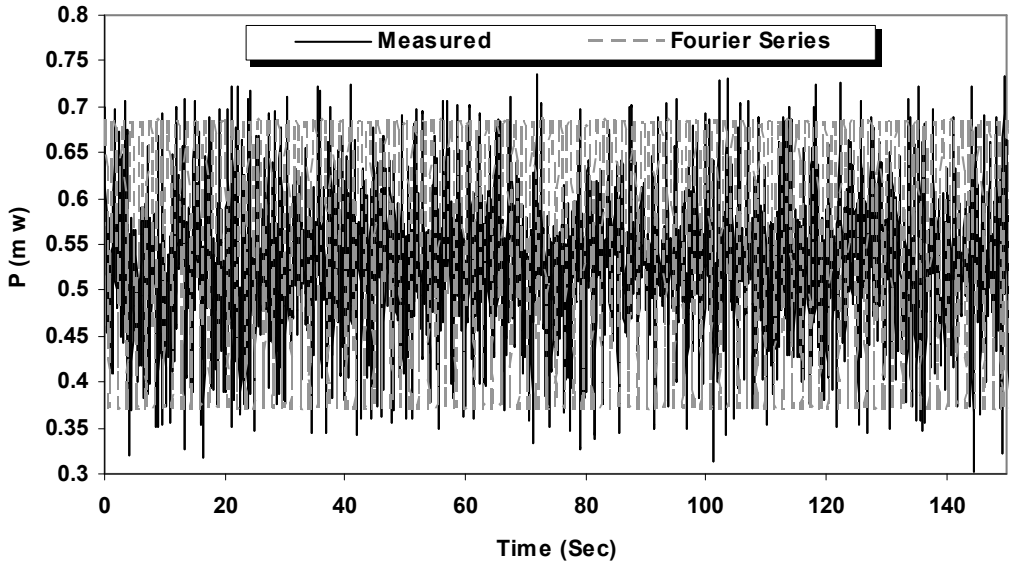
شکل (۱۱) مقایسه‌ای بین ماکزیمم، مینیمم و متوسط فشارهای اعمالی بر لوله در موقعیتهای زاویه‌ای مختلف (عمق آب در مخزن بالادست ۰/۲۹۵ متر بوده‌است) را ارائه می‌کند. ملاحظه می‌شود که ماکزیمم فشار در شرایطی که شیب مجرا صفر، دبی هوا ٦٧ لیتر بر دقیقه و دبی آب ۲۷۰ لیتر بر دقیقه است حدوداً ۲/۵ برابر هد آب بالادست 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 پدیدهٔ ناخواسته، تمهیدات لازم را برای پایدار سازی سازهٔ تونل مخصوصاً در ورودی پیش‌بینی کند.

شکل (۱۲) تغییرات P_h/h بر حسب غلظت متوسط را در شیبهای مختلف نشان می‌دهد. با ملاحظهٔ 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 ۰/۵ و در شیب ٤ درصد به ازای غلظت متوسط برابر ۰/٤۲، فشار متوسط به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد. در سایر شیبها مقدار غلظت متوسط که به ازای آن فشار متوسط، ماکزیمم است بین ۰/٤۲ و ۰/۵ قرار دارد. در ضمن حداکثر مقدار فشار نرمالایز شده نسبت به هد هیدرواستاتیکی، در شیب صفر حدود ۲/۷ و در شیب ٤ درصد حدود ۳/۹ است. برای بررسی تأثیر ضریب فشار (ضریب اصطکاک دو فازی، $1/2f_{TP}$)، ضریب اصطکاک دو فازی طبق معادلهٔ بلاسیوس به صورت زیر مورد استفاده قرار گرفت.

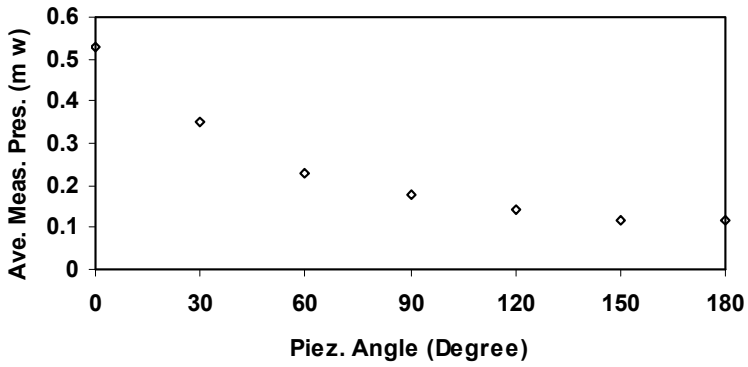
$$f_{TP} = 0.079\left(\frac{GD}{\bar{\mu}}\right)^{-0.25} \qquad (۷)$$

شکل (۱۳)، تغییرات P_h/h را بر حسب K_f نمایش می‌دهد. در این شکل می‌توان دریافت که فشار متوسط بر حسب K_f به صورت درجهٔ 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 شیبها در K_f حدود ۲۰۰، اتفاق می‌افتد و ماکزیمم منحنیها از ۲/۷ در شیب صفر تا ۳/۹ در شیب ٤ درصد تغییر می‌کند. شکل (١٤) تغییرات فشار متوسط را بر حسب عدد رینولدز دو فازی (Re_G) در شیبهای مختلف نمایش می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که ارتباط معنی داری بین فشار متوسط و عدد رینولدز دو فازی وجود ندارد. البته طبق نظر بسیاری از محققان [۲۰] هنگامی که در یک آبگیر به طور

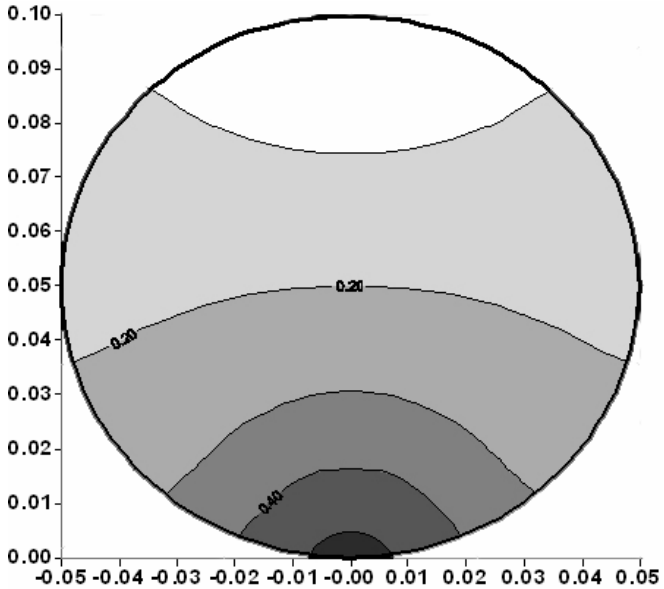
[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.5.0]



شکل۸- مقایسهٔ نتایج اندازه‌گیریهای انجام شده و نتایج حاصل از بسط سری زمانی

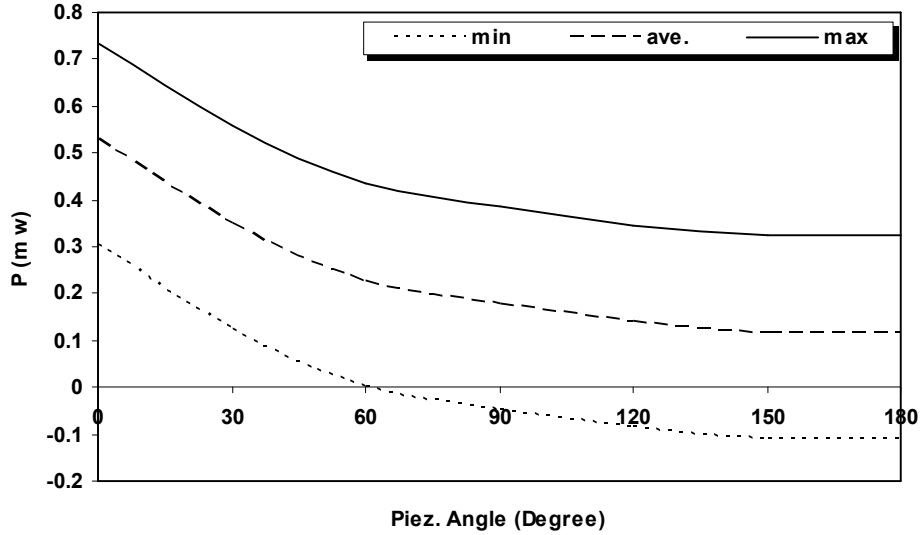


شکل ۹- تغییرات نوسانات متوسط فشار در یک مقطع در موقعیتهای زاویه‌ای مختلف

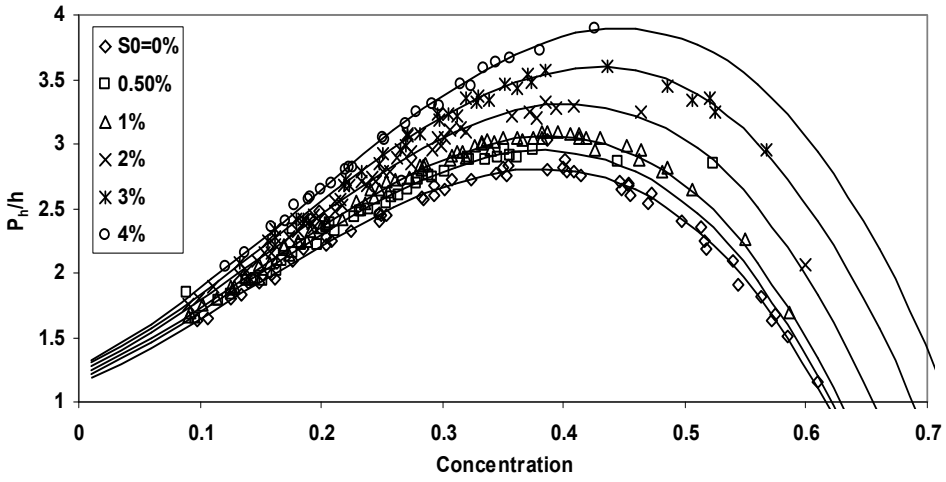


شکل ۱۰- نمونه‌ای از منحنیهای توپوگرافی نوسانات فشار متوسط در مجرا

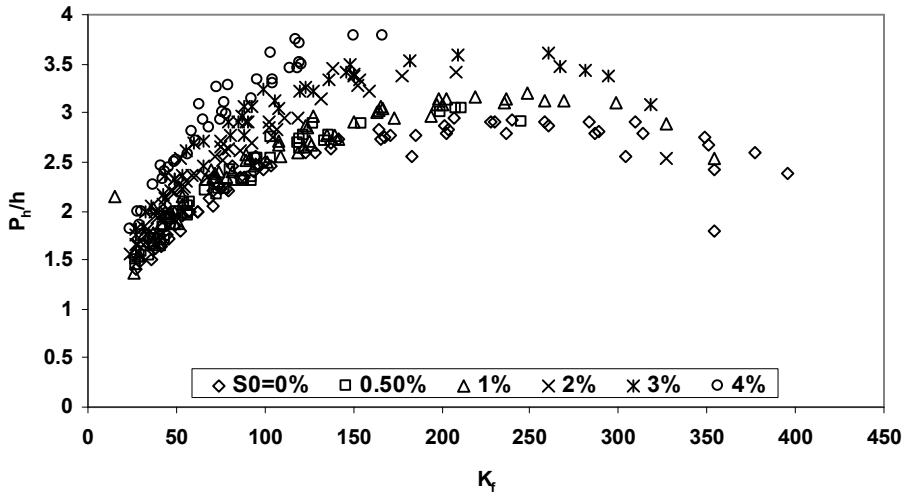
[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.5.0]



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

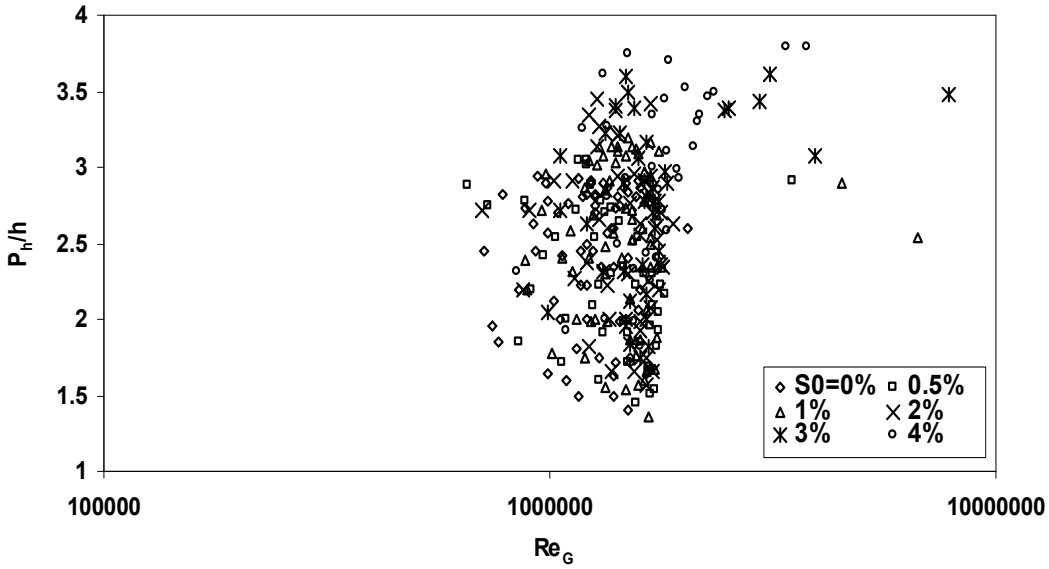


شکل ۱۲- تغییرات P_h/h بر حسب غلظت متوسط در شیبهای مختلف

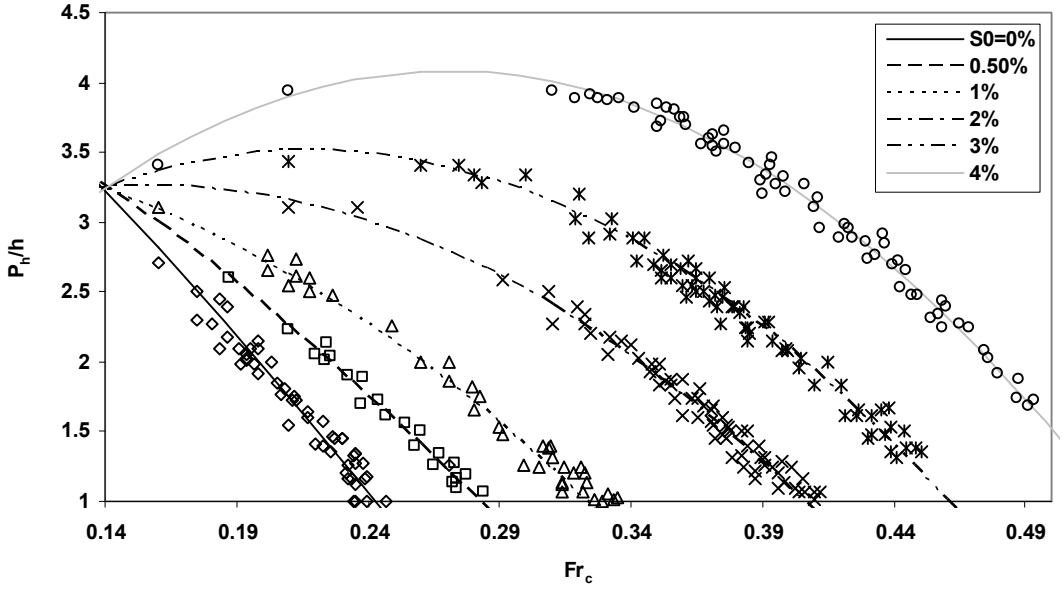


شکل ۱۳- تغییرات فشار متوسط بر حسب K_f

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.5.0]



شکل ١٤- تغییرات فشار متوسط بر حسب عدد رینولدز دو فازی

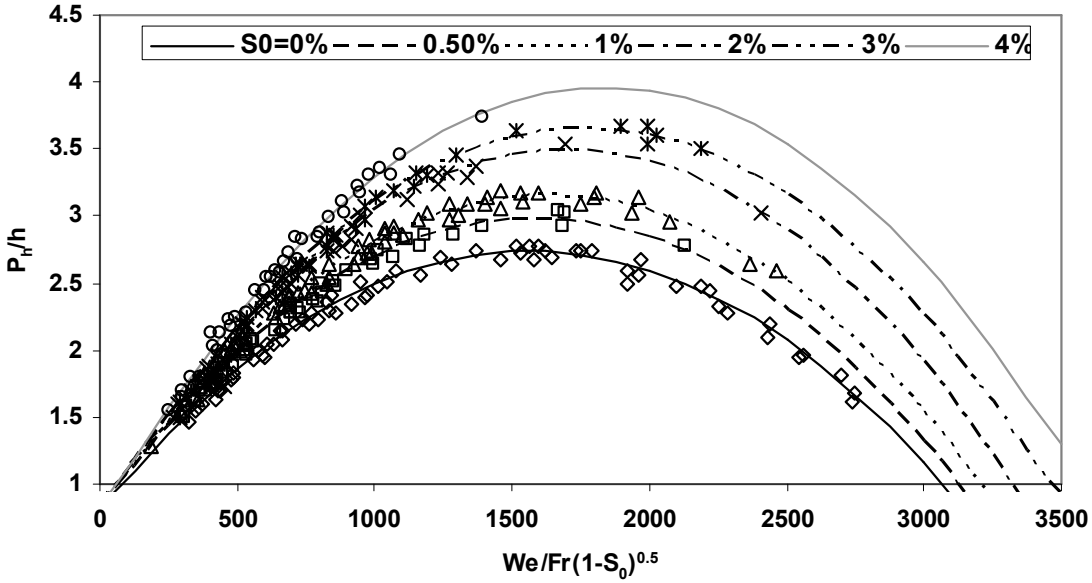


شکل ١٥- تغییرات P_h/h برحسب عدد فرود موج لخته‌ای در شیبهای مختلف

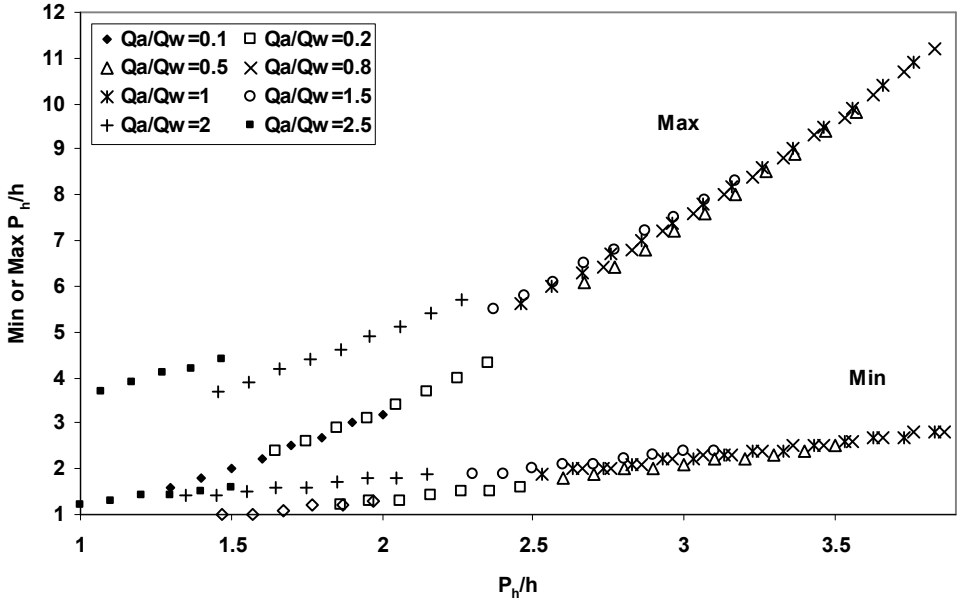
متوسط عدد رینولدز از ٣٠٠٠٠ بیشتر می‌شود، تأثیر لزجت سیال ناچیز است. شکل (١٥)، تغییرات P_h/h بر حسب عدد فرود موج لخته‌ای را در شیبهای مختلف نشان می‌دهد. با ملاحظهٔ این شکل می‌توان دریافت که در عدد فرود برابر ٠/١٤ فشار در تمامی شیبها برابر است و با افزایش عدد فرود نسبت به ٠/١٤، به جز در شیبهای ٣ و ٤ درصد، فشار کاهش می‌یابد. در شیبهای ٣ و ٤ درصد با افزایش عدد فرود موج لخته‌ای، ابتدا فشار افزایش و سپس کاهش می‌یابد. شکل (١٦) تغییرات P_h/h را برحسب wfs در شیبهای مختلف نشان می‌دهد، که در آن wfs برابر با $We/Fr(1-S_0)^{0.5}$ است. ملاحظه می‌شود که، در wfs حدود ١٧٠٠، در تمامی شیبها مقدار فشار متوسط به ماکزیمم مقدار خود می‌رسد. این ماکزیمم از حدود ٢/٧ در شیب صفر تا حدود ٣/٩ در شیب ٤ درصد تغییر می‌کند.

در بخشهای قبل ارتباط فشار متوسط و متغیرهای بی‌بعد

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.5.0]



شکل ١٦- تغییرات فشار متوسط بر حسب wfs در شیبهای مختلف

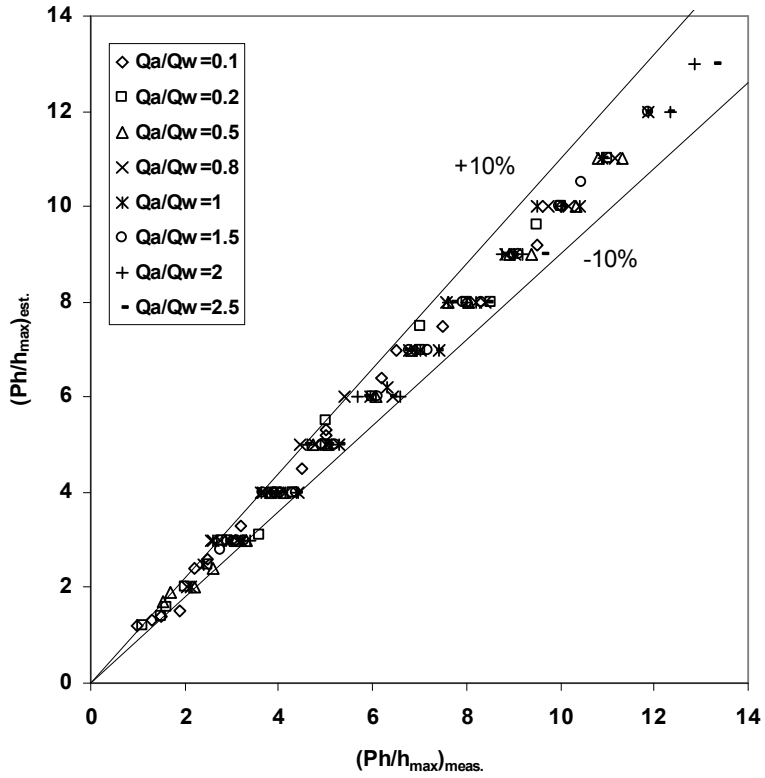


شکل ١٧- تغییرات مقادیر نرمالایز شدهٔ ماکزیمم و مینیمم فشار بر حسب متوسط فشار در نسبت دبیهای مختلف آب و هوا

موجود در معادلهٔ (٥) ارائه شد. برای تعیین فشار متوسط بر حسب متغیرهای اشاره شده، معادلاتی در مرجع [٢١] 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 (١٧) تغییرات مقادیر نرمالایز شدهٔ 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 شدهٔ ماکزیمم و مینیمم فشار را بر حسب متوسط فشار در نسبت دبیهای مختلف آب و

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.5.0]



شکل ۱۸- مقایسهٔ نتایج اندازه‌گیری و نتایج تخمینی با استفاده از معادلهٔ (۸)

هوا به صورت زیر پیشنهاد داد.

$$\left(\frac{P_h}{h}\right)_{max} = 0.6e^{-4.8S_0}\left(1.2(\frac{P_h}{h})^2 + 2.4(\frac{Q_a}{Q_w})^{0.75}\right) \quad (۸)$$

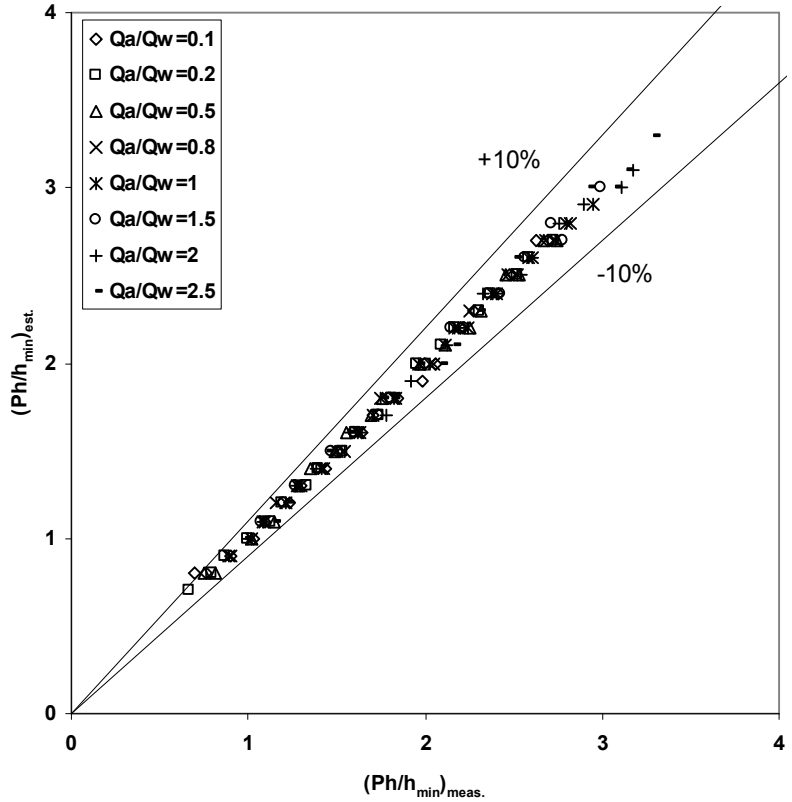
$$\left(\frac{P_h}{h}\right)_{min} = 0.6e^{1.25S_0}\left(0.95(\frac{P_h}{h})^{1.1} + 0.45(\frac{Q_a}{Q_w})^{0.85}\right) \quad (۹)$$

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 اندازه گیری شده در محدودهٔ ۱۰±٪ قرار دارند و همسازی بسیار خوبی بین نتایج تخمینی و اندازه‌گیری شده وجود دارد. طبق شکلهای (۱۲) تا (۱۶)، مقدار میانگین فشار به اعداد بی‌بعد معادلهٔ (۵) نسبت داده شد، بنابراین می‌توان برای تعیین ارتباط متغیرهای مورد بررسی و مقادیر ماکزیمم و مینیمم از معادلات (۸) و (۹) استفاده کرد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله نتایج بررسی انجام شده بر روی نوسانات فشار در مدل آزمایشگاهی جریان دو فازی آب و هوا در تونلها و مجاری تحت‌فشار ارائه شده است. آزمایشات در شیبهای صفر تا ٤ درصد که متداولترین شیبهای مورد استفاده در تونلهای آب‌بر 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 ٤ و حداکثر فشار اعمالی به سازه به حدود ۱۰ برابر هد 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 پدیدهٔ ناخواسته به شدت ضربانی است و لذا بایستی در صورت پیش‌بینی احتمال وقوع، مخصوصاً در ناحیهٔ ورودی تونل تمهیدات لازم

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.5.0]



شکل ۱۹- مقایسهٔ نتایج اندازه گیری و نتایج تخمینی با استفاده از معادلهٔ (۹)

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

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 می‌آید.

مراجع

1. Martin, C. S., "Entrapped Air in Pipelines," *Proc. of the 2nd Int. Conf. on Pressure Surges*, BHRA Fluid Eng., London, September 22-24, 1976.
2. Falvey, H. T., "Air-Water Flow in Hydraulic Structures," *Eng. Monograph*, No. 41, US Department of the Intrior, Water and Power Resources Service, 1980.
3. Levy, S., *Two-Phase Flow in Complex Systems*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1999.
4. Collier, J. G., *Convective Boiling and Condensation*, 3rd Edit., Clarendon Press, Oxford, 1996.
5. Hahn, U., "Safe Operation of Closed Conduit Systems at Slug Flow Condition," *Wasserbau und Wasserwirtsckaft*, No.75, Techniqsche UniversiTat Munchen, pp. 68-93, 1995.
6. USBR, *Design of Small Canal Structures*, Bureau of Reclamation. United States Department of the Interior, Denver, Colorado, 1978.
7. Kalinske, A. A., and Robertson, J. M., "Closed Conduit Flow," Trans. Am. Soc. of Civil Eng. (ASCE), Vol.108, pp.1435-1516, 1943.
8. 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.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.5.0]

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 Stefller, 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 فازی آب و هوا در تونلهای آب‌بر*، رسالهٔ دکترا، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکدهٔ 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 2nd Inter. Symp. On Two-Phase Flow Modeling and Experimentation, Italy*, pp.1825-1832, 1999.
19. Kunugi, T., Sataki, S., and Ose, Y., "Direct Simulation on Wave Formation and Breaking of Turbulent Flow". *Proc. Of 2nd 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.

[DOR: 20.1001.1.2251600.1384.24.2.5.0]