

## الگوهای جریان دوفازی آب و هوا در تونل‌های آب‌بر افقی و با شیب کم

عبدالرضا کبیری سامانی (دکتری)  
سید محمود برقی (دانشیار)  
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف  
محمدحسن سعیدی (دانشیار)  
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف

هرگاه دو سیال با ویژگی‌های فیزیکی گوناگون (در این مورد آب و هوا)، به صورت هم‌زمان در یک مجرا جریان داشته باشند، الگوهای مختلفی از جریان به صورت تصادفی رخ می‌دهند. الگوی جریان، چگونگی توزیع هر فاز جریان در مجرا در برابر فاز دیگر است. به عبارت دیگر مهم‌ترین مشخصه‌ی جریان‌های دوفازی وجود فصل مشترک بین فازهای هوا و آب است. این فصل مشترک اشکال مختلفی دارد، و در حالت کلی می‌توان با طبقه‌بندی انواع حالات و توزیع فصل مشترک بین دو فاز آب و هوا، که اصطلاحاً رژیم‌های جریان یا الگوهای جریان نامیده می‌شوند، به توضیح و تفسیر این نوع جریان‌ها پرداخت. در این نوشتار بررسی آزمایشگاهی مهم‌ترین الگوهای محتمل جریان در مجاری طولی (نظیر تونل‌ها) مد نظر بوده است و ضمن انجام تحلیل ابعادی مناسب و تعیین پارامترهای بی‌بعد مؤثر بر جریان به ارائه‌ی نقشه‌های الگوهای مختلف جریان براساس اعداد بدون بعد و ترکیب مناسب آنها برای شیب‌های مختلف می‌پردازیم و در نهایت اثر تلفیقی پارامترهای مختلف بدون بعد در یک نقشه‌ی کلی ارائه شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهند، شیب خط لوله و برخی اعداد بدون بعد - نظیر کسر حجمی هوا یا عدد فرود مؤثر بر جریان - اثرات قابل ملاحظه‌ی بر تغییر فصل مشترک دو فاز ایجاد می‌کنند.

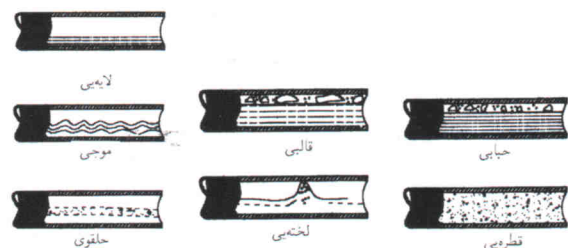
### مقدمه

هوا و تشکیل جریان دوفازی در موارد متعددی مشاهده شده است، نظیر کانال‌های باز با جریان سریع آب و سرریزها، سرریزهای نیلوفری، شفت‌های قائم، دریچه‌های اضطراری در مدخل پستاک، لوله‌های خمیده (سیفون‌های معکوس)، کالورت‌ها، و تونل‌ها و مجاری آب‌بر با شرایط هندسی مختلف که در شرایط خاص، زمینه‌ی ورود هوا و تشکیل جریان دوفازی آب و هوا در آن‌ها به وجود می‌آید و به تبع آن رژیم‌های خاصی اتفاق می‌افتند، که پیامد نهایی آن خرابی و خسارت شدید و گاه جبران‌ناپذیر است.<sup>[۱]</sup> جریان‌های دوفازی بسته به میزان دبی آب و هوا و فصل مشترک ایجاد شده بین آنها به دسته‌های مختلفی تقسیم می‌شوند. به عبارت دیگر مهم‌ترین مشخصه‌ی جریان‌های دوفازی وجود فصل مشترک بین فازهای آب و هوا است. این فصل مشترک اشکال مختلفی دارد، و امکان پیدایش دامنه‌ی نامحدودی از فصل مشترک‌های مختلف بین دوفاز وجود دارد. اما عموماً تأثیر کشش سطحی بین دوفاز منجر به پیدایش فصل مشترک‌های مختلف منحنی شکل می‌شود که نهایتاً تمامی آنها تبدیل به اشکال کروی یا شبه کروی نظیر قطرات، حباب‌ها و غیره می‌شوند.<sup>[۲]</sup> در حالت کلی، با طبقه‌بندی انواع حالات و توزیع فصل مشترک بین دوفاز هوا و آب که اصطلاحاً «رژیم‌های جریان» یا «الگوهای جریان» نامیده می‌شوند، می‌توان به توضیح و تفسیر این نوع جریان‌ها پرداخت. باید توجه داشت که این رژیم‌های

در بسیاری از پروژه‌های مهندسی، بین جریان آب عبورکننده از میان یک سازه و هوای متحرک در مجاورت آب اندرکنش شدیدی به وقوع می‌پیوندد. یکی از مهم‌ترین پدیده‌های طبیعی و ناخواسته‌ی این اندرکنش، اختلاط آب عبوری از سازه‌ها و جریان هوای اطراف آن است که در برخی موارد باعث واکنش‌های شدید بین آب و هوای موجود شده و خسارت‌های قابل ملاحظه‌ی به همراه دارد. این نوع جریان را «جریان دو فازی» می‌نامند.<sup>[۱]</sup> جریان دوفازی از کلیه‌ی قوانین حاکم بر مکانیک سیالات تبعیت می‌کند. سیستم‌های جریان دوفازی به شدت پیچیده‌اند (حتی جریان دو فازی یک‌بعدی در مجاری) و مشخصه‌های زیادی سبب نامعینی و پیچیدگی این نوع جریان‌ها در مقایسه با جریان‌های تک‌فازی می‌شوند. برای ساده‌سازی این پیچیدگی‌ها، محققین مختلف به انجام آزمایشات مدلی روی آورده‌اند تا با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و تجربی بتوانند به منظور تحلیل مسائل عملی و مهندسی به معادلات ساده‌ی دست یابند. جریان‌های دو فازی آب و هوا در مسائل مختلف و سازه‌های گوناگون - اعم از فرایندهای شیمیایی، تولید و تشکیل انرژی، سیستم‌های جمع‌آوری و انتقال آب، صنعت نفت و خطوط لوله‌ی دریایی برای انتقال نفت - اتفاق می‌افتند.<sup>[۲]</sup> در سازه‌های هیدرولیکی و سازه‌های مرتبط با مهندسی عمران، اندرکنش آب و

است؛ به طوری که با استفاده از تصاویر دریافت شده می‌توان تا اندازه‌ی نوع جریان موجود را تفسیر کرد. [۴] مهم‌ترین الگوهای محتمل در مجاری افقی و نزدیک به افقی (تونل‌ها و مجاری بسته)، رژیم‌های لخته‌یی، موجی و چینه‌یی هستند. 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. بسیاری از محققین با توجه به شباهت‌های هندسی رؤیت شده، رژیم‌های مذکور را جزء یکی از سه رژیم اصلی یاد شده می‌دانند. رژیم چینه‌یی وقتی رخ می‌دهد که آب یا فاز مایع در پایین لوله و نزدیک به کف، و هوا یا فاز گازی در قسمت بالایی جریان مایع و نزدیک به سقف حرکت می‌کنند و دو لایه‌ی مجزا تشکیل می‌شود. رژیم موجی زمانی رخ می‌دهد که دبی هوا نسبت به جریان چینه‌یی افزایش یابد و موج‌های متناوب و یکنواختی در طول لوله تشکیل شده و به حرکت درآیند. با افزایش دبی یا سرعت هوا نسبت به جریان موجی، امواج در شرایطی سقف تونل را لمس کرده و باعث گسستگی لایه‌ی هوا می‌شوند و در نتیجه رژیم لخته‌یی به وجود می‌آید. موضوع مهم و قابل توجه در جریان‌های دوفازی برخورداری این نوع جریان‌ها از طبیعت نوسانی و وابسته به زمان است. که بسته به رژیم جریان این مشخصات نوسانی تغییر می‌کنند. همین طبیعت نوسانی جریان سبب بروز واکنش‌هایی خاص در جریان دوفازی می‌شود؛ مثلاً بر فشار و افت فشار در مجرا تأثیر گذارده و شرایطی کاملاً ناخواسته و غیرقابل پیش‌بینی را به وجود می‌آورد؛ برای نمونه، ضمن وقوع پدیده‌ی «جریان دوفازی» در مجاری تحت فشار، نوسانات شدید و خسارت‌بار فشار در مجرا بروز می‌کند که علاوه بر اثرات و خسارات آبی، در دراز مدت باعث خستگی و گسیختگی سازه‌های حاوی جریان و گاه خسارات غیر قابل جبران، یا صرف هزینه‌های گزاف به منظور اصلاح یا بهبود عملکرد سیستم می‌شود. بررسی‌های محققین مختلف نشان داده که هرگاه رژیم غیر قابل کنترلی (نظیر رژیم لخته‌یی) در یک مجرای تحت فشار اتفاق بیفتد، جریان به شدت ضربه‌یی شده و فشارهای آبی اعمالی به سازه نسبت به شرایط جریان دائم تا چندین برابر افزایش می‌یابد. [۷] علاوه بر این، وجود آب و هوا و اختلاط این دو عنصر در یک مجرا سبب کاهش راندمان و ایمنی مجرا یا خط لوله می‌شود و خوردگی و فرسایش بدنه‌ی لوله را به همراه دارد. از این رو باید سیستم انتقال به نحوی طراحی شود که مانع از بروز جریان دوفازی زیان‌بار شود یا در صورت بروز پدیده، سازوکار مناسبی برای مقابله و تحمل اثرات آن در سیستم هیدرولیکی تمهید و پیش‌بینی شود. [۳] محققین در گزارش‌های جداگانه‌یی نمونه‌های متعددی از خرابی و خسارات جریان دوفازی در مجاری انتقال نفت را ارائه کرده‌اند و عامل اصلی این خسارات را طبیعت نوسانی جریان

جریان معمولاً به وسیله‌ی موقعیت و شکل هندسی خط لوله، جهت جریان، خواص فیزیکی و شدت جریان هریک از فازها و گاهی انتقال دما از دیواره‌ی لوله، تحت تأثیر قرار می‌گیرند. الگوهای جریان دوفازی براساس توزیع تدریجی آب و هوا تقسیم‌بندی می‌شوند و عامل بسیار مهم در این رده‌بندی، تشکیل محدوده‌ی وسیعی از جریانات دوفازی با شکل هندسی مختلف و مشخصات هیدرولیکی گوناگون ثقل است. نیروی جاذبه سبب جدایی سیالات می‌شود که بسته به مقدار این نیرو و جهت آن، در مقایسه با جهت جریان، تأثیر به‌سزایی در شکل هندسی فصل مشترک سیالات و مرز انتقال از یک رژیم به رژیم دیگر دارد. لازم به ذکر است که علی‌رغم کوشش‌های بسیار زیاد به عمل آمده برای طبقه‌بندی انواع رژیم‌های جریان دوفازی، تمامی این روش‌ها به شدت کیفی‌اند و اغلب مطابق نقطه‌نظرات شخصی محققین مختلف هستند. به طوری که تاکنون رژیم‌های مختلفی تعریف شده و برای این منظور دامنه‌ی گسترده‌یی از عناوین، برای این منظور مورد استفاده قرار گرفته‌اند (شکل ۱). این الگوها عبارت‌اند از: جریان حبایی، جریان تویی یا قالبی، جریان لایه‌یی، جریان موجی، جریان لخته‌یی، جریان حلقوی، و جریان قطره‌یی. [۵] روش‌های پیش‌بینی الگوهای جریان دوفازی درون خطوط لوله‌ی انتقال جریان به‌طور کلی به دو گروه: «استفاده از امکانات تجربی و آزمایشگاهی» و «استفاده از مدل‌های تحلیلی و سازوکارهای فیزیکی» تقسیم‌بندی می‌شوند. از سال‌ها پیش، پیش‌بینی انواع رژیم‌های جریان دوفازی هوا-آب در خطوط لوله، از طریق آزمایش‌های تجربی مورد توجه بوده است. یک روش معمول برای این منظور، جمع‌آوری اطلاعات آزمایشی نرخ‌های جریان فازهای گازی و مایع و خواص فیزیکی هر یک از فازها روی قسمتی از خطوط لوله‌ی مورد آزمایش است. پس از جمع‌آوری اطلاعات آزمایشی، تحقیقاتی به منظور تعیین انواع رژیم‌های جریان دوفازی در یک نمودار دوعده‌ی از طریق قرار دادن مرزهای انتقالی بین رژیم‌های جریان، تحقیقاتی انجام می‌شود. معمولاً تحقیقات لازم در ارتباط با شناسایی انواع الگوهای جریان دوفازی در خطوط لوله‌ی انتقال جریان‌های دوفازی با استفاده از روش مشاهده‌ی مستقیم جریان‌ها انجام می‌گیرد. از جمله روش‌هایی که این مشاهدات را میسر می‌سازد «عکس‌برداری بسیار سریع»، و «راديوگرافی با اشعه‌ی ایکس»



شکل ۱. الگوهای جریان دوفازی در مجاری افقی و شیب‌دار.



به معیارهای مناسب برای طراحی کامل مجاری و چاه‌های افقی دست یافت. [۱۳] وی به بررسی ناپایداری و نواحی انتقال رژیم‌های دوفازی می‌پردازد. مهم‌ترین الگوهای مشاهده شده، مطابق با شکل ۲ ج به دست آمده‌اند. فدرر معیار زیر را برای انتقال از رژیم جریان چینه‌یی به رژیم لخته‌یی پیشنهاد کرد:

$$V_G > \left[ 1 - \frac{h_L + 1/2D}{D} \right] \left[ \frac{(\rho_L - \rho_G)g \cos \alpha A_G}{\rho_G \left( \frac{dA_L}{dh_L} \right)} \right] \quad (3)$$

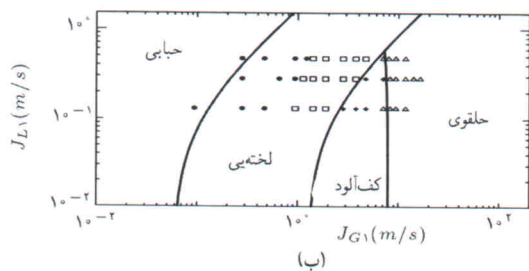
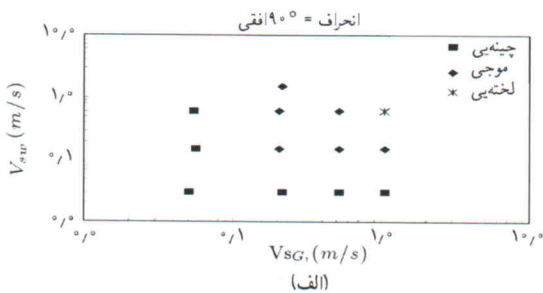
در بررسی آزمایشگاهی نقشه‌های رژیم‌های جریان دوفازی در یک مجرای مستطیلی با ابعاد  $26 \times 12$  میلی‌متر، رژیم‌های جریان توسط دوربین دیجیتال و با تکنیک پردازش تصاویر استخراج شد. [۱۴] همچنین در یک تحقیق تجربی پارامترهای مدل شار رانشی محاسبه شد. [۱۵] در یک تحقیق آزمایشگاهی، با هدف دسته‌بندی جریان‌های دوفازی و تعیین کسر فضای خالی براساس دبی جریان، نقشه‌ی رژیم‌های جریان دوفازی و کسر فضای خالی در مجاری افقی بررسی شد. [۱۶] این جریان‌ها در یک تحقیق جامع، با بهره‌گیری از مدل شار رانشی، مورد بررسی تحلیلی و آزمایشگاهی قرار گرفتند، [۱۷] و نهایتاً الگوهای جریان دوفازی آب و هوا مطابق شکل ۳ الف ارائه شد. در یک بررسی آزمایشگاهی، نوسانات ناشی از جریان دوفازی گاز-مایع در اتصالات T شکل، مشخصات نوسانی این جریان در محل اتصال دو مجرای هم‌اندازه با قطر ۵۵ میلی‌متر مورد بررسی قرار گرفته است. [۱۸] در این تحقیق، اثرات جدایش جریان بر مشخصات نوسانی جریان‌ها و نیز

دوفازی تشکیل شده و ضربات فشاری شدید جریان بر مجرا معرفی کردند. [۸ و ۹] روش‌ها و نمودارهای متعددی برای پیش‌بینی الگوهای جریان دوفازی در مجاری افقی و شیب‌دار با شیب کم ارائه شده است. لازم به ذکر است اکثر این نمودارها بر اطلاعات تجربی متکی‌اند. یکی از متداول‌ترین نمودارهای تعیین انواع رژیم‌های جریان دوفازی افقی نمودار بکر است. [۱۰] وی با استفاده از خصوصیات فیزیکی سیال، پارامترهای زیر را تعریف کرد:

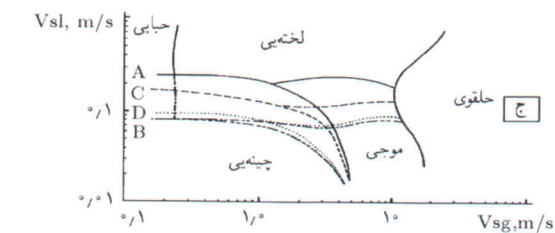
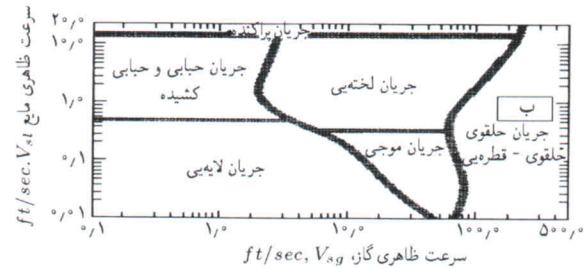
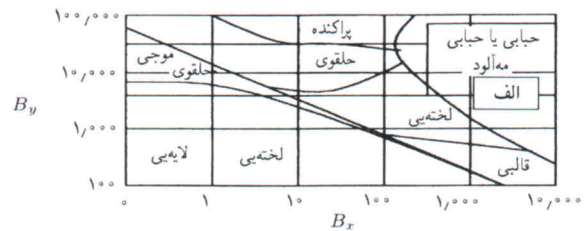
$$B_x = 531 \left[ \frac{\dot{m}_l}{\dot{m}_g} \right] \left[ \frac{\mu_l^{0.33}}{\sigma_l} \right] \left[ \frac{\rho_g^{0.5}}{\rho_l^{0.166}} \right] \quad (1)$$

$$B_y = 2.16 \left[ \frac{\dot{m}_g}{\pi(d/24)^2} \right] \sqrt{\rho_l \rho_g} \quad (2)$$

نمودار بکر برحسب دو عبارت  $B_x$  و  $B_y$ ، مطابق شکل ۲ الف ارائه می‌شود. تحقیقات بعدی نشان داد که این نمودار در نمایش تأثیر پارامترهای مختلف سیستم‌ها ضعیف است. در سال ۱۹۷۴ نقشه‌ی گسترده‌ی تعیین الگوی جریان بر مبنای یک روش تازه مطرح شده ارائه شد شکل ۲ ب، که در بین الگوهای جریان ارائه شده تاکنون، نتایج این تحقیقات تعاریفی را شامل می‌شود که با بیشترین اقبال عمومی محققین مختلف مواجه شده است. [۱۱ و ۱۲] فدرر در تحقیقی



شکل ۳. الف) نقشه‌های الگوهای جریان دوفازی در مجرای افقی؛ ب) نقشه‌ی الگوهای جریان در اتصال T شکل. [۱۸]



شکل ۲. نمودار تعیین الگوهای جریان دوفازی در خطوط لوله‌ی افقی؛ الف) Baker, ۱۹۷۵, ب) Mandhane, ۱۹۷۵ و ج) Federer, ۱۹۹۲.

که در آن FPT الگوی جریان،  $Q_a$  دبی هوا،  $Q_w$  دبی آب،  $D$  قطر مجرا،  $L$  مشخصه طولی،  $g$  شتاب ثقل،  $\rho$  چگالی حجمی و  $\varphi$  زاویه مجرا با افق است. اندیس‌های  $w$  و  $a$  به ترتیب معرف هوا و آب هستند. با انتخاب  $Q_w$ ،  $D$  و  $\rho_w$  به عنوان متغیرهای تکراری، رابطه‌ی پارامترهای بی‌بعد عبارت خواهد بود از:

$$FPT = f\left(\frac{Q_a}{Q_w}, \frac{\rho_a}{\rho_w}, \frac{gD}{V_m^2}, \frac{L}{D}, \sin \varphi\right) \quad (5)$$

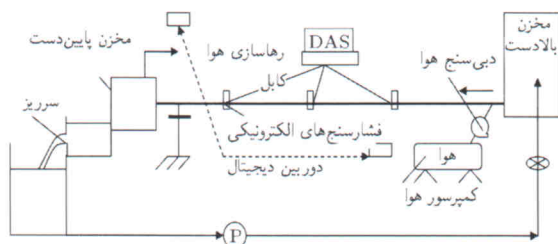
که در آن  $V_m = V_a + V_w$  و  $\sin \varphi = S_0$ . با استفاده از مفهوم حجم مخصوص و نسبت آن با چگالی حجمی سیالات ( $va/v_w = \rho_w/\rho_a$ ) و  $\alpha = v_a/(v_a + v_w)$  که  $v$  حجم هر یک از سیالات و  $\alpha$  کسر حجمی هوا (کسر فضای خالی) است، لذا:

$$FPT = f\left(\frac{Q_a}{Q_w}, Fr_m, \alpha, \frac{L}{D}, S_0\right) \quad (6)$$

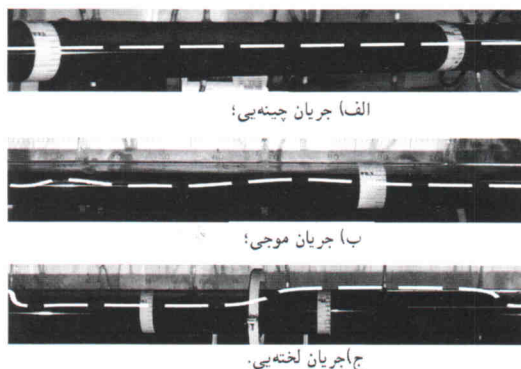
که در آن  $Fr_m$  عدد فرود است.

### مدل آزمایشگاهی و مشخصات آزمایشات

مدل مورد استفاده در این تحقیق مطابق شکل ۴ ترکیبی است از مجرای اصلی انتقال آب با قطر ۹۰° و طول ۱۰ متر. مخزن بالادست مخزنی است فلزی و به شکل مکعب مستطیل که در وسط دیواره‌ی طولی آن در ارتفاع ۵ سانتی‌متر از کف سوراخی به قطر ۱/۸ متر به منظور اتصال مجرا به مخزن تعبیه شده است. مخزن پایین دست از جنس



شکل ۴. شمای کلی بخش‌های مختلف مدل آزمایشگاهی.



شکل ۵. نمونه‌هایی از رژیم‌های جریان مورد مطالعه.

نقشه‌ی الگوهای جریان مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۳ ب). از سوی دیگر، جریان دوفازی گاز-مایع و الگوهای جریان در سلول‌های با سوخت بسپاری، بررسی شدند.<sup>[۱۹]</sup> در یک تحقیق آزمایشگاهی، محققین به بررسی رژیم‌های جریان دوفازی در مجاری با قطر کم پرداختند.<sup>[۲۰]</sup> در این تحقیق نقشه‌های رژیم‌های جریان و مرز انتقال بین رژیم‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی آزمایشگاهی نقشه‌های الگوهای جریان دوفازی آب و هوا در پمپ‌های هوا و جریان حاصل از آن در مجاری قائم با جریان رو به بالا انجام شده است.<sup>[۲۱]</sup> علی‌رغم گستردگی تحقیقات پیشین، به خصوص در مورد جریان‌های دوفازی در شرایطی که فاز گازی در اثر تغییر حالت فاز مایع (یعنی در اثر تبخیر) به وجود می‌آید، تحقیقات مناسبی در ارتباط با جریان‌های دوفازی، نظیر جریان همزمان آب و هوا در مجاری، به خصوص در مجاری با قطر زیاد (نظیر تونل‌ها و کالورت‌ها و آبراهه‌های تحت فشار) صورت نگرفته است. اکثر تحقیقات پیشین مربوط به جریان‌های مایع و گاز در فرایندهای شیمیایی و در قطرهای کم (کوچک‌تر از ۵ سانتی‌متر) بوده است، واضح است که در این قطرها تأثیرات ثانویه‌ی نظیر کشش سطحی و لزجت ظاهر می‌شوند. لذا در حال حاضر نقصان اطلاعاتی شدیدی در ارتباط با استانداردها و روش‌های طراحی مناسب برای پیش‌بینی مشخصه‌های هیدرولیکی جریان‌های دوفازی وجود دارد. مهندسان محاسب در این بخش اطلاعات کامل و مفیدی به منظور طراحی دقیق و همه‌جانبه‌ی سیستم‌های دوفازی ندارند. این مطلب، به‌ویژه در سازه‌های هیدرولیکی به دلیل کمبود اطلاعات و ناکافی بودن تحقیقات - اعم از نظری یا آزمایشگاهی - بیشتر مشهود است. بر این اساس، عموماً به تجربیات قبلی، یا حدس و گمان اکتفا می‌شود. در این تحقیق با تکیه بر مدل‌سازی آزمایشگاهی مهم‌ترین رژیم‌های محتمل در تونل‌ها و مجاری با قطر زیاد مورد بررسی قرار گرفته است و ضمن انجام تصویربرداری و پردازش تصاویر، شرایط لازم برای وقوع هر یک از رژیم‌های جریان دوفازی مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین تأثیر پارامترهای مختلف حاکم بر جریان بر اساس اطلاعات حاصل از انجام تحلیل ابعادی ارائه شده است.

### تحلیل ابعادی و پارامترهای مؤثر

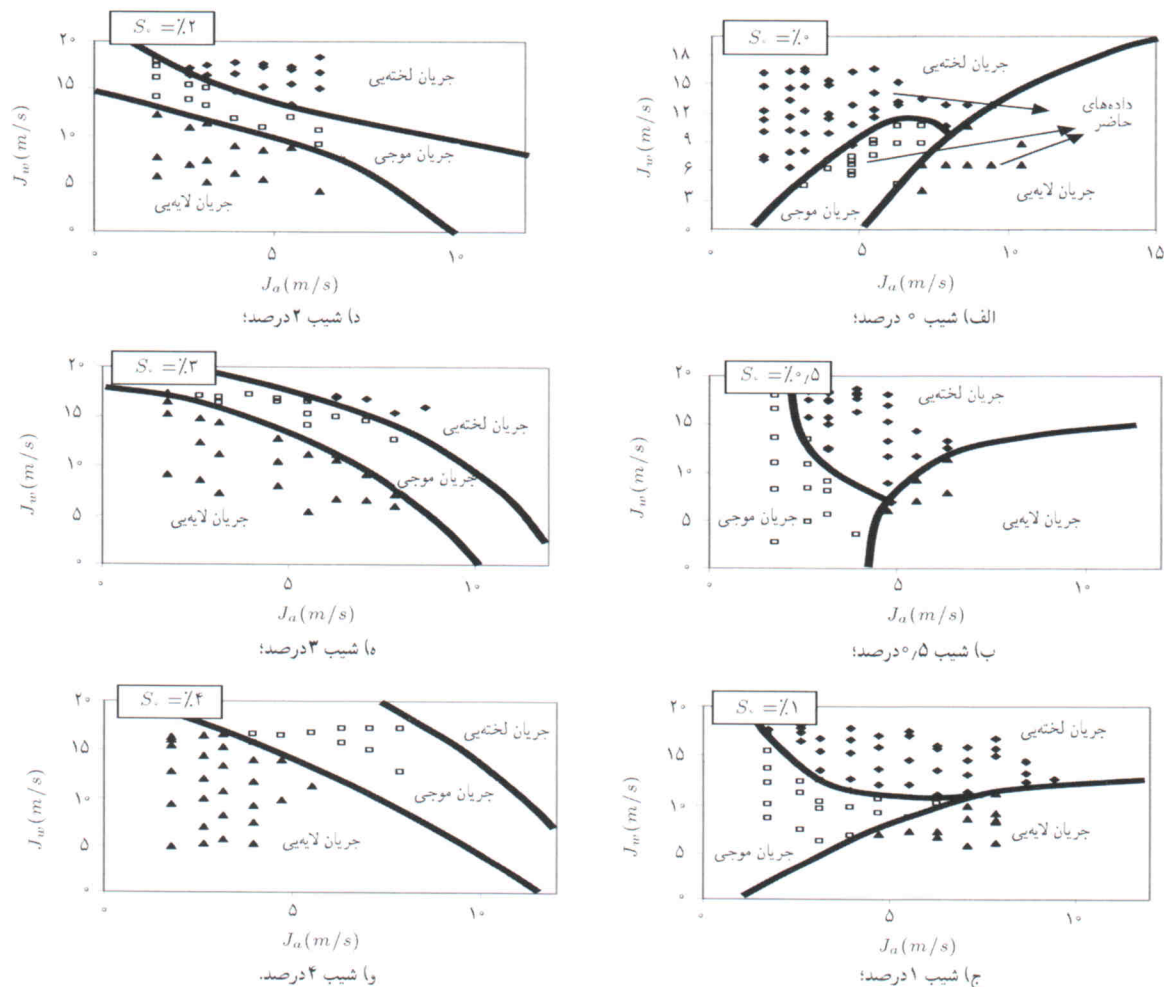
با توجه به تعدد پارامترها و پیچیدگی‌های خاص مسئله برای دست‌یابی به پارامترهای مؤثر بر الگوی جریان، استفاده از معادلات تجربی و نیمه‌تجربی بهترین روش است. به منظور بسط معادله‌ی پایه‌ی برای تعیین الگوی جریان در مجرا نیز می‌توان از روش‌های کلاسیک تحلیل ابعادی استفاده کرد. با توجه به اهمیت نیروهای جاذبه و شناوری، رابطه‌ی الگوی جریان چنین بیان می‌شود:<sup>[۳]</sup>

$$FPT = f(Q_a, Q_w, D, L, g, \rho_a, \rho_w, \varphi) \quad (4)$$

### نتایج

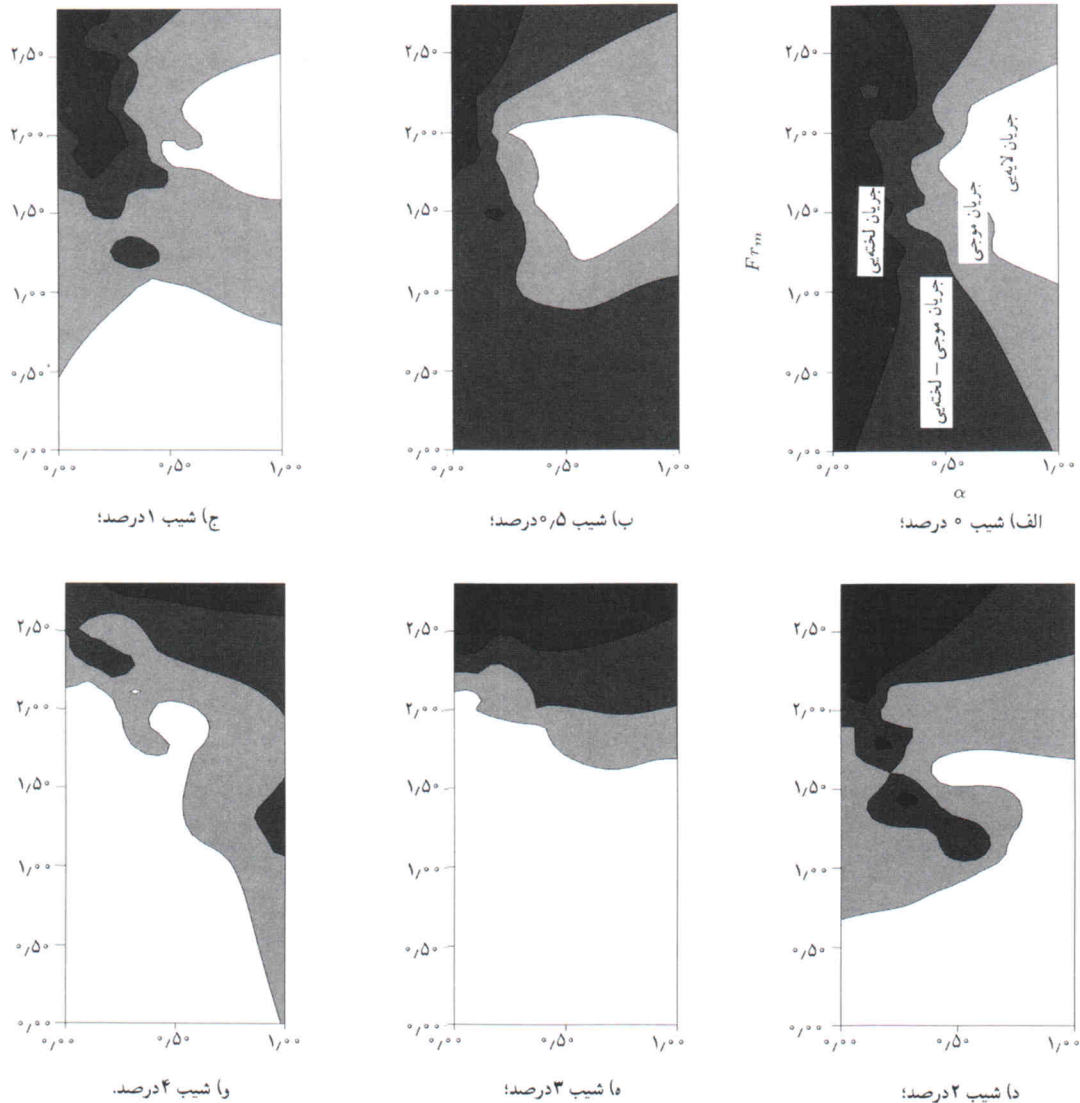
شکل ۵ نمونه‌هایی از رژیم‌های جریان مورد مطالعه در این تحقیق را که در جریان همزمان آب و هوا در مدل آزمایشگاهی مورد بحث مشاهده شده‌اند، نشان می‌دهد. با دقت در این شکل‌ها تفاوت‌های بارز سطح آب و مرز تماس آب و هوا در رژیم‌های مختلف قابل ملاحظه و تأمل است. شکل ۶ نیز نقشه‌های الگوهای جریان دوفازی آب و هوا را برحسب تغییرات  $J_w$  در مقابل  $J_a$  در شیب‌های مختلف نمایش می‌دهد. در این اشکال  $J_a$  و  $J_w$  به ترتیب سرعت‌های ظاهری آب و هوا برحسب متر بر ثانیه هستند.  $J_w = Q_w/A$  و  $J_a = Q_a/A$  که  $Q_a$  و  $Q_w$  به ترتیب دبی‌های آب و هوا و  $A$  سطح مقطع لوله است. با دقت در این اشکال محدوده‌ی تغییرات سه رژیم اصلی مورد بررسی در این تحقیق قابل مشاهده و بررسی است. همچنین اثر قابل ملاحظه‌ی شیب مجرا در تغییرات نقشه‌های الگوهای جریان و روال تغییر رژیم جریان در محدوده‌های مختلف قابل تأمل است. شکل ۷ نقشه‌های تغییرات الگوهای جریان را در

پلکسی‌گلاس شفاف بوده و در دیواره‌ی انتهایی آن دو شیر خروجی با قابلیت کنترل سطح آب تعبیه شده است. مخزن ذخیره برای تأمین آب مورد نیاز پمپ، سرریز و مخزن سرریز برای اندازه‌گیری دبی آب مجرا بعد از مخزن پایین دست تعبیه شده، که بدین منظور از یک سرریز مثلثی لبه‌تیز با زاویه‌ی ۹۰ درجه، و برای تعیین عمق آب روی سرریز از مانومتری با دقت ۰/۱ میلی‌متر استفاده شده است. دبی هوا توسط یک دستگاه روتامتر با دقت ۱ لیتر در دقیقه قبل از ورود به مجرا اندازه‌گیری می‌شود. از کرومومتر برای اندازه‌گیری پیوند موج و دوربین دیجیتال با قابلیت برداشت ۸ فریم در ثانیه و سیستم عکس‌برداری همراه با اشل برای بهره‌گیری از شیوه‌ی پردازش تصاویر برای تعیین طول موج، ارتفاع سطح آب و تعداد موج استفاده می‌شود. در ضمن با استفاده از نرم‌افزار Xing Mpeg Player کلیپ‌های کوتاه تهیه شده با دوربین به عکس تبدیل شد. با استفاده از این نرم‌افزار هر ثانیه از یک کلیپ به حداکثر ۴۸ فریم تبدیل، و اطلاعات لازم از این عکس‌ها استخراج شد.



شکل ۶. نقشه‌ی الگوهای جریان دوفازی آب و هوا برحسب  $J_w$  در شیب‌های مختلف.



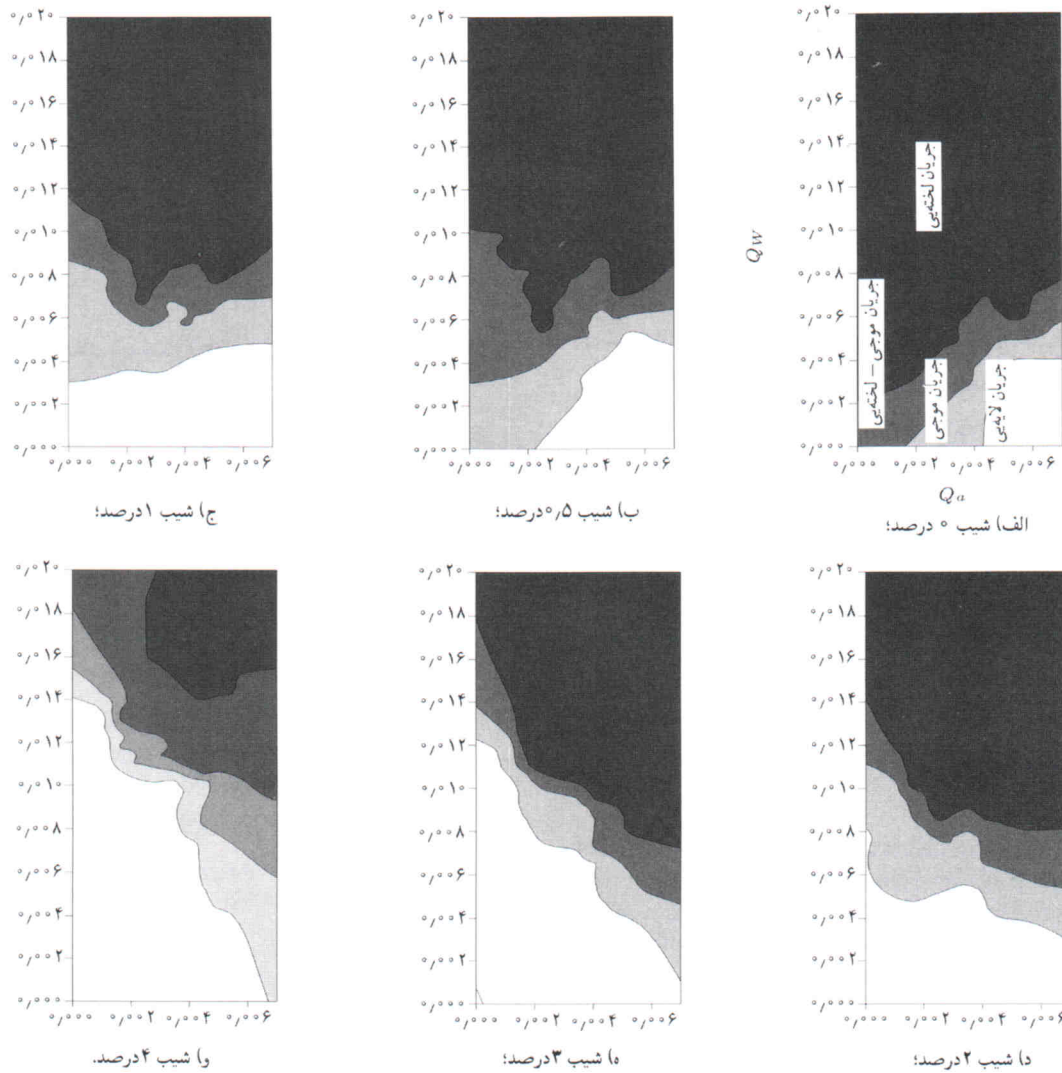


شکل ۷. نقشه‌ی الگوهای جریان برحسب عدد فرود و کسر فضای خالی در شیب‌های مختلف.

شیب‌های کم باید دبی هوا زیاد و دبی آب کم باشد؛ در حالی که در شیب‌های بیشتر برای دستیابی به رژیم جریان چینه‌ی باید دبی هوا و آب هر دو کاهش یابند. شکل ۹ در یک جمع‌بندی کلی نقشه‌ی الگوی جریان را که در آن  $10 Fr_m (1 - S_0)^{0.5}$  در مقابل  $\alpha L/D$  ترسیم شده است، نمایش می‌دهد. با دقت در این شکل می‌توان دریافت که رژیم جریان لخته‌ی زمانی رخ می‌دهد که  $10 Fr_m (1 - S_0)^{0.5}$  بیشتر از ۲۵ و  $\alpha L/D$  کم‌تر از ۳۰ باشد؛ برای محدوده‌های بالاتر از خط  $10 Fr_m (1 - S_0)^{0.5} = -0.6 \alpha L/D + 10.6$  این نوع رژیم جریان می‌تواند اتفاق افتد. محدوده‌های وقوع دیگر رژیم‌های جریان، یعنی چینه‌ی و موجی، نیز در این شکل کلی که در آن هم اثرات مشخصات هیدرولیکی جریان و هم مشخصات هندسی مجرا (نظیر شیب) آورده شده، ارائه شده است.

ارتباط با سه رژیم اصلی یاد شده در مجاری طویل، براساس عدد فرود مخلوط دوفازی ( $Fr_m = V_m / (gD)^{0.5}$ ) در مقابل کسر فضای خالی نشان می‌دهد. با دقت در این شکل‌ها نیز اثر قابل ملاحظه‌ی شیب بر تغییرات نقشه‌ی الگوهای جریان قابل مشاهده است. در ضمن در شیب صفر و شیب‌های نزدیک به صفر جریان لخته‌ی هنگامی تشکیل می‌شود که کسر فضای خالی کم و عدد فرود مخلوط دوفازی زیاد باشد.

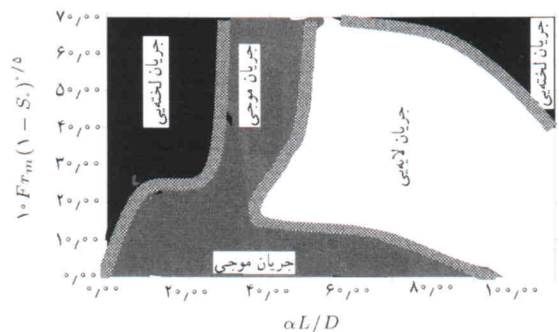
شکل ۸ نقشه‌های تغییرات الگوهای جریان را در ارتباط با سه رژیم اصلی یاد شده در مجاری طویل و براساس دبی آب در مقابل دبی هوا نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در شیب صفر و شیب‌های نزدیک به صفر جریان لخته‌ی هنگامی تشکیل می‌شود که دبی هوا زیاد و دبی آب کم باشد. برای دستیابی به رژیم جریان چینه‌ی در



شکل ۸. نقشه‌ی الگوهای جریان برحسب دبی‌های آب و هوا در شیب‌های مختلف.

جریان‌های دوفازی، به‌ویژه در سازه‌های هیدرولیکی به‌دلیل کمبود اطلاعات و ناکافی بودن تحقیقات، اعم از نظری یا آزمایشگاهی وجود دارد و معمولاً در چنین مواردی به تجربیات قبلی، یا حدس و گمان اکتفا می‌شود.

با مقایسه‌ی نتایج، مشابهت نقشه‌های الگوهای جریان به دست آمده در تحقیق حاضر و نتایج تحقیقات پیشین، [۱۱] و [۱۳] جز در برخی نواحی در ارتباط با سه رژیم اصلی یاد شده، قابل مشاهده است (شکل ۱۰). در این شکل سه الگوی جریان اصلی در مجاری با اقطار بالا (چینه‌بی، موجی و لخته‌بی) مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. با دقت در این شکل نزدیکی اطلاعات به دست آمده در این تحقیق و نتایج حاصل از تحقیقات پیشین، [۱۳] قابل مشاهده است. بنابراین در نگاه اول نقشه‌ی الگوهای جریان به دست آمده در این تحقیق می‌تواند ابزاری مناسب برای پیش‌بینی الگوهای جریان دوفازی آب و هوا در مجاری

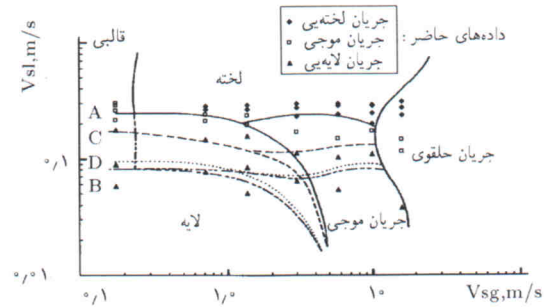


شکل ۹. نقشه‌ی الگوی جریان برحسب  $10 Fr_m (1 - S_0)^{0.5}$  در مقابل  $\alpha L/D$ .

### نتیجه‌گیری

در حال حاضر نقصان اطلاعاتی شدیدی در ارتباط با استانداردها و روش‌های طراحی مناسب برای پیش‌بینی مشخصه‌های هیدرولیکی

کالورت‌ها و آبراهه‌های تحت فشار است که طبق بررسی به عمل آمده، در این زمینه تحقیقات مناسبی صورت نگرفته است. لازم به ذکر است که تمامی نقشه‌های موجود برای قطرهای کم (کوچک‌تر از ۵ سانتی‌متر) استخراج شده‌اند و واضح است که در این قطرها تأثیرات ثانویه نظیر کشش سطحی و لزجت بر الگوی جریان و سازوکار رفتاری آن مشهود است. دلیل عمده تفاوت نقشه‌های جریان در این تحقیق با تحقیقات پیشین در برخی نواحی نیز وجود همین تأثیرات ثانوی است. در ضمن رژیم جریان لخته‌یی زمانی رخ می‌دهد که  $Fr_m(1 - S_0)^{0.5}$  بیشتر از ۲/۵ و  $\alpha L/D$  کم‌تر از ۳۰ باشد؛ برای محدوده‌های بالاتر از خط  $Fr_m(1 - S_0)^{0.5} = -0.6/\alpha L/D + 1.06$  این نوع رژیم جریان می‌تواند اتفاق افتد.



شکل ۱۰. مقایسه‌ی نتایج تحقیق فعلی با تحقیقات پیشین. [۱۳]

باشند. مزیت این اشکال سادگی و قابلیت پیش‌بینی الگوهای جریان در مجاری با قطر زیاد، به‌خصوص در سازه‌های هیدرولیکی نظیر تونل‌ها،

## پانویس

### 1. Flow Pattern Type (FPT)

## منابع

- Martin, C.S., "Entrapped air in pipelines", Proceedings of the second international conference on pressure surges, London, September 22-24, 1976, BHRA Fluid Engineering, Cranfield, Bedford, England (1976).
- Mattew, P. and Peramaki, P. E. and Mark, D. and Nelson, P. E., The significance of two-phase flow regimes in designing multi-phase extraction systems, LBG Article, www.lbgweb.com (2000).
- Falvey, H. T., "Air-water flow in hydraulic structures", *Eng. Monograph*, No. 41, US Department of the Interior, Water and Power Resources Service (1980).
- Hewitt, G. F. and Taylor, N. S., *Annular two-phase flow*, Pergamon Press., Oxford (1970).
- Levy, S., *Two-phase flow in complex systems*. John Wiley & Sons, Inc., New York (1999).
- Selegim, P. Jr. and Hervieu, E., "Direct imaging of two-phase flows by electrical impedance measurements", *I.O.P. Pub., Meas. Sci. Tech.*, **9**, pp. 1492-1500 (1998).
- McCorquodale, J. A. and Hamam, M. A., "Modeling surcharged flow in sewers", Proc. Int. Symp. On Urban Hydrology, Hydraulics and Sediment Control, Univ. of Kentucky, Lexington, Ky, USA, pp. 331-338 (1982).
- Szepesi, J., "Packer forces and tubing movements in oil and gas production wells". *Banyaszati es Kohaszati Lapok. Koolaj es Foldgaz*, 1972, 2, pp. 336-338 (1972).
- Butlin, D. M., "Artificial lift in horizontal wells", Conf. on Horizontal Well Tech., Houston, Texas (1990).
- Baker, O., "Gas-liquid flow in pipeline, II. Design manual", AGA-API Project NX-28 (1975).
- Mandhane J. M. and Gregory G. A. and Aziz K., "A flow pattern map for gas-liquid flow in horizontal pipes", *Int. J. Multiphase flow*, **1**, pp. 537-553 (1974).
- Govier, G. W. and Aziz, K., *The flow of complex mixtures in pipes*, Van Nostrand Reinhold Co., New York (1972).
- Federer, I., "Development of design criteria for well completion in horizontal wells", OTKA 022840, Research Program, National Scientific Research Foundation, Hungary (1992).
- Xu, J. L. and Cheng, P. and Zhao, T. S., "Gas-liquid two-phase flow regimes in rectangular channels with mini/micro gaps", *International Journal of Multiphase Flow*, **25** (3), pp. 411-432 (1999).
- Chen, Y. and Durlofsky, L. J. and Aziz, K., "Calculation of drift flux parameters", 9<sup>th</sup> SUPRI-HW Industrial Affiliates Meeting (2001).



16. McVety, J., "Flow regime map and void fraction for air-water two-phase flow in a horizontal pipe", Eng. Phys., EP 3003 (2001).
17. Shi, H. and Oddie, G. and Alkaya, B., "Multiphase wellbore flow: Experimental study and drift flux model", 10<sup>th</sup> SUPRI-HW Industrial Affiliates Meeting (2002).
18. Wang, S. F. and Ozawa, M. and Shoji, M., "Fluctuation of gas-liquid two-phase flow through an impacting T-junction", Research Program Report, Sasakawa scientific Research, Japan Science Society, Japan (2003).
19. Yang, X. G. and Zhang, F. Y. and Lubawy, A. L. and Wang, C. Y., "Visualization of Liquid Water Transport in a PEFC", Electrochemical and Solid-State Letters, 7 ~11, pp. A408-A411 (2004).
20. Cubaud, T. and Ho, C. M., "Transport of bubbles in square microchannels", PHYSICS OF FLUIDS, **16** (12), pp. 4575-4585 (2004).
21. Samaras, V. C. and Margaris, D. P., "Two-phase flow regime maps for air-lift pump vertical upward gas-liquid flow", *International Journal of Multiphase Flow*, **31** (6), pp. 757-766 (2005).

