

# بررسی تجربی و مدل‌سازی جریان سیال دوفازی در خم ۹۰° و ۱۸۰° افقی

احسان معتمدیان\*<sup>+</sup>، نوراله کشیری، احد قائمی

تهران، دانشگاه علم و صنعت ایران، دانشکده مهندسی شیمی، صندوق پستی ۱۶۳-۱۶۷۶۵

**چکیده:** در این پژوهش، تاثیر خم ۹۰° و ۱۸۰° افقی بر افت فشار و الگوی جریان دوفازی برای مخلوط آب - هوا در داخل لوله با قطر داخلی ۲٫۴ سانتی‌متر مورد بررسی قرار گرفته است. بر اساس داده‌های تجربی به دست آمده مدلی برای پیش‌بینی افت فشار در خم‌ها ارائه شده است. مقایسه مدل به دست آمده با سایر مدل‌های موجود نشان می‌دهد که مدل اخیر نتیجه‌های بهتر و قابل قبولی برای پیش‌بینی افت فشار در خم‌ها ارائه می‌کند. آزمایش‌های متعددی نیز برای مشاهده الگوی جریان در مجاورت خم‌ها انجام شده است. در گستره‌ای از جریان، الگوی جریان در ناحیه بازیافت به طور موقت به الگوی جریان حلقوی تبدیل می‌شود. بر پایه این مشاهده‌ها، دو نقشه الگوی جریان برای بیان تاثیر خم‌ها در تغییر الگوی جریان دوفازی پیشنهاد شده است.

**واژه‌های کلیدی:** خم، جریان دوفازی، افت فشار، الگوی جریان، مدل.

**KEY WORDS:** Bend, Two phase flow, Pressure loss, Flow pattern, Model.

## مقدمه

خم‌ها دارای کاربردهای فراوانی در صنعت از جمله در مبدل‌های حرارتی از نوع U، بویلرها، سردکننده‌ها، و لوله‌های انتقال و غیره می‌باشند. در این صنایع جریان به صورت تک‌فازی و دوفازی می‌تواند ایجاد شود. برای جریان تک‌فازی مطالعه‌های متعددی توسط پژوهشگران متفاوت صورت گرفته است [۱-۴]. زمانی که سیال در داخل خم جریان دارد، نیروی گریز از مرکز سیال سریع‌تر را به سمت خارج خم و سیال کندتر را به سمت داخل آن هدایت می‌کند و باعث انتقال ماکسیمم سرعت محوری به طرف دیواره خارجی و در نتیجه آن ایجاد جریان‌های ثانویه می‌شود. این پدیده باعث افزایش افت فشار در خم نسبت به لوله مستقیم می‌شود [۱]. در واقع افت فشار در خم ناشی از دو عامل اصطکاک و تغییر شکل آن است. مقدار جریان ثانویه با افزایش شعاع خم و کاهش سرعت سیال کاهش می‌یابد. بنابراین، Dean

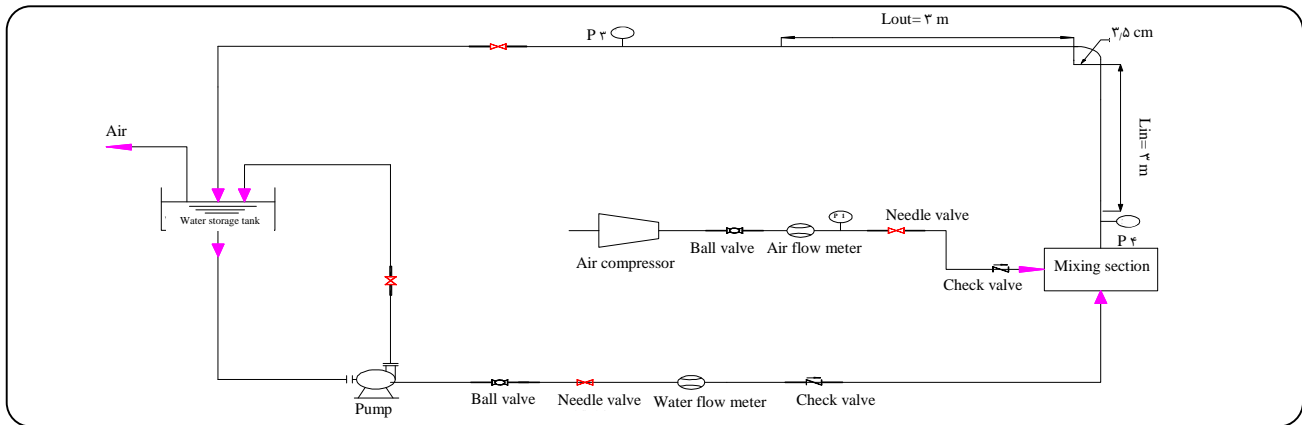
خم‌ها بدون بعدی را برای جریان در لوله‌های خمیده ارائه کرد [۲]  $(De=Re(2R/d))^{1/5}$  که در این رابطه عدد رینولدز، R شعاع انحنا، d قطر داخلی لوله و R/d نسبت انحنا، خم می‌باشد. عدد Dean بیانگر نسبت نیروی اینرسی و گریز از مرکز به نیروی ویسکوز و معیاری برای نشان دادن مقدار جریان ثانویه می‌باشد. در صورتی که عدد De از یک مقدار بحرانی تجاوز نماید، دو عدد گردابه با چرخش دایروی متقابل در نزدیکی دیواره خارجی مشاهده می‌شود. در جریان دوفازی افت فشار خم به علت اتلاف‌های ناشی از اصطکاک مداوم بین دوفاز، تغییر رژیم جریان در خم، جدایی و اختلاط مجدد فاز گاز و مایع افزایش می‌یابد [۵ و ۶].

پژوهش‌های محدودی در زمینه افت فشار جریان در خم‌ها انجام شده است. Sekoguchi و همکارانش [۷] جریان آب - هوا در داخل خم ۹۰° افقی با نسبت انحنا ۱٫۵ و قطر داخلی لوله ۲٫۵۴ سانتی‌متر

شعاع خم و کاهش سرعت سیال کاهش می‌یابد. بنابراین، Dean

+E-mail: motamedian@iust.ac.ir

\*عهده دار مکاتبات



شکل ۱- شماتیک دستگاه آزمایش.

با بررسی این مدل‌ها ملاحظه می‌شود که هر یک از آنها پارامترهای متفاوتی را برای محاسبه افت فشار در نظر گرفته‌اند و با محاسبه افت فشار توسط هر یک از آنها در شرایط یکسان و مقایسه نتیجه‌ها مشاهده می‌شود که این نتیجه‌ها تفاوت زیادی با یکدیگر دارند. بنابراین، بررسی علت تفاوت پیش‌بینی این مدل‌ها و میزان دقت هر یک از آنها و همچنین ارایه مدلی که تمام پارامترهای موثر بر افت فشار را در نظر بگیرد، ضروری است. همچنین پژوهش‌های بسیار کمی در زمینه تاثیر خم بر الگوی جریان دوفازی انجام شده است که از آن جمله می‌توان به پژوهش‌های Wang و همکارانش [۱۷ و ۱۸] اشاره کرد. آنها تاثیر خم  $180^\circ$  افقی بر الگوی جریان دوفازی را در لوله‌های با قطر کم (۳، ۴/۹۵، ۶/۹ میلی‌متر) مورد مطالعه قرار دادند. Wang جریان دوفازی در خم را به پنج ناحیه ۱- بالا دست جریان ۲- ناحیه کند شدن جریان ۳- خم ۴- ناحیه بازیافت ۵- پایین دست جریان تقسیم نمود. همچنین در این پژوهش نمودار الگوی جریان ارایه شده توسط Coleman برای لوله‌های مستقیم با قطر کم بر اساس مشاهدات و با در نظر گرفتن تاثیر خم  $180^\circ$  تغییر داده شد و نمودار الگوی جریان جدیدی برای هر قطر لوله و نسبت انحناء ارایه شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود پژوهش‌های انجام شده در این زمینه ناچیز بوده و بنابراین، مطالعات بیشتر ضروری است.

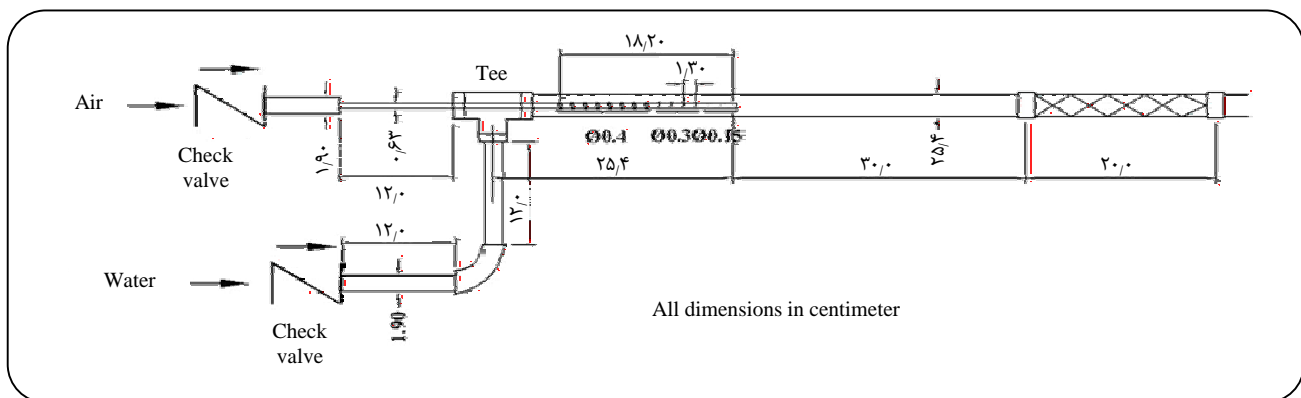
### شرح دستگاه

تصویر شماتیک دستگاه تجربی اندازه‌گیری افت فشار و مشاهده الگوی جریان دوفازی برای خم  $90^\circ$  در حالت افقی در شکل ۱ آورده شده است. در ابتدا آب به وسیله‌ی یک پمپ سانتریفیوژ از

را مورد بررسی قرار دادند. آنها افت فشار جریان دوفازی را با استفاده از ضریب‌های تصحیح افت فشار اصطکاکی  $\phi_{bl}$  بر حسب  $X_b$  ارایه کردند. Sekoda و همکارانش [۸] نیز در کاری مشابه افت فشار در خم  $90^\circ$  افقی با نسبت انحنای  $5/0.2$  و  $2/36$  و قطر داخلی لوله  $1/8$  سانتی‌متر را مورد بررسی قرار دادند. همچنین Fitzsimmons [۹] کار تجربی خود را روی سیستم آب - بخار آب و خم  $90^\circ$  با قطر داخلی  $5/0.8$  سانتی‌متر، برای دو نسبت انحنای خم  $1/0.4$  و  $2/56$  و شرایط عملیاتی فشار  $55/15$ ،  $82/73$  و  $110$  بار<sup>(۱)</sup> انجام داد. این پژوهشگر نتیجه‌های خود را در نمودارهای ضریب تصحیح اصطکاکی  $\phi_{blo}$  بر حسب کیفیت  $x$  ارایه کرد. Chisholm [۱۰] به کمک این نتیجه‌های تجربی معادله‌های خود را بر پایه ضریب تصحیح افت فشار اصطکاکی برای خم  $90^\circ$  و  $180^\circ$  افقی ارایه کرد.

Mandal و همکارانش [۱۱] جریان دوفازی گاز و چهار سیال نیوتنی متفاوت را در چهار خم افقی  $45^\circ$ ،  $90^\circ$ ،  $135^\circ$ ،  $180^\circ$  مورد بررسی قرار دادند و نتیجه‌های خود را بر پایه ضریب اصطکاک دوفازی خم ارایه کردند. Azzi و همکارانش [۵ و ۶] نیز افت فشار خم  $90^\circ$  عمودی با ورودی رو به بالا و خروجی افقی را مورد بررسی قرار داده و بر اساس نتیجه‌های آن مدلی را ارایه کردند. از جمله دیگر مدل‌ها می‌توان به مدل Sookprasong [۱۲] بر اساس نتایج تجربی روی خم  $90^\circ$ ، مدل Paliwoda [۱۳] برای خم‌های  $45^\circ$ ،  $90^\circ$  و  $180^\circ$ ، مدل Subbu [۱۴] برای خم  $180^\circ$  افقی و مدل Usui [۱۵] برای خم  $180^\circ$  در دو حالت افقی و عمودی اشاره کرد. Azzi [۱۶] با مقایسه متغیرهای مستقل موثر و محدودیت‌های هر یک از مدل‌ها به بررسی نظریه‌ی آنها پرداخته است.

(۱) Bar



شکل ۲- بخش اختلاط.

در این بخش هوا از سمت راست سه راهی به وسیله لوله‌ای به قطر ۰/۶۳ سانتی‌متر و به کمک یک تبدیل وارد جریان مایع، که از قسمت پایین سه راهی وارد لوله شده است، می‌شود. بر روی لوله هوا مطابق شکل، ۱۵ ردیف سوراخ تعبیه شده است که هر ردیف از چهار سوراخ در محیط لوله که نسبت به هم ۹۰ درجه هستند، تشکیل شده است. برای جلوگیری از ورود آب به لوله هوا قطر سوراخ‌ها در طول لوله تغییر داده شده به طوری که قطر آن در ۸ ردیف اول ۴ میلی‌متر، ۴ ردیف دوم ۳ میلی‌متر و ۳ ردیف آخر ۱/۵ میلی‌متر است. انتهای لوله هوا مسدود است. همچنین فاصله مرکز به مرکز سوراخ‌ها ۱/۳ سانتی‌متر است. برای اختلاط بهتر دو فاز در قسمتی از لوله به طول ۲۰ سانتی‌متر صفحه‌ای ماریچ قرار داده شده که باعث اغتشاش بیشتر جریان و در نتیجه اختلاط بهتر دوفاز می‌شود. لوله‌ها در این بخش از جنس فولاد ضد زنگ است.

بخش آزمایش به منظور مشاهده الگوی جریان دوفازی و بررسی تاثیر اتصال بر آن از جنس لوله شیشه‌ای و شفاف ساخته شده است. قطر لوله در تمامی قسمت‌ها ۲/۴ سانتی‌متر و ضخامت آن ۳ میلی‌متر است. به طور کلی این بخش از سه قسمت ورودی، اتصال و خروجی تشکیل شده است که به وسیله فلنچ‌هایی از جنس پلی‌اتیلن به هم متصل شده‌اند. قسمت‌های ورودی و خروجی برای ایجاد جریان به طور کامل توسعه یافته در هنگام ورود سیال دوفازی به قسمت اتصال و خروج از آن، اندازه‌گیری افت فشار در طول مسیر لوله و مشاهده الگوی جریان قبل و بعد از خم ایجاد شده‌اند. طول این دو قسمت ۳ متر می‌باشد که از

مخزن نگهداری به داخل سیستم فرستاده می‌شود و هوای فشرده به وسیله کمپرسور وارد سیستم می‌شود. در مسیر جریان آب پس از پمپ یک جریان برگشتی در نظر گرفته شده که با تنظیم شیر آن میزان آب ورودی به سیستم کنترل می‌شود. پس از انشعاب برگشتی در مسیر جریان به ترتیب شیر توپی<sup>(۱)</sup>، شیر سوزنی<sup>(۲)</sup>، روماتر<sup>(۳)</sup>، آب، شیر یک‌طرفه<sup>(۴)</sup> قرار دارد. در نهایت آب به سه راهی اختلاط وارد می‌شود.

در مسیر هوا پس از کمپرسور به ترتیب شیر توپی، روماتر هوا، فشار سنج، شیر سوزنی و شیر یک‌طرفه قرار گرفته است. این مسیر نیز به سه راهی اختلاط منتهی می‌شود. برای اندازه‌گیری دبی آب و هوا از روماتر استفاده شده است. گستره‌ی اندازه‌گیری دبی آب از ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ لیتر بر ساعت و گستره‌ی اندازه‌گیری دبی هوا از ۱۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ لیتر بر ساعت در فشار ۱ بار و دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد است.

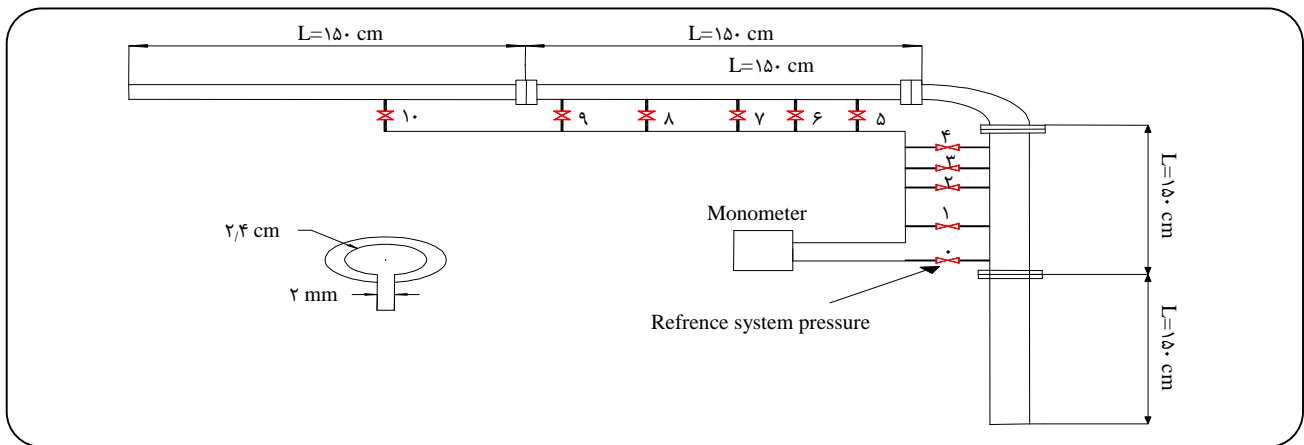
در دو مسیر جریان آب و هوا، شیرهای توپی برای قطع و وصل سریع جریان قرار داده شده است. با استفاده از شیرهای سوزنی میزان سیال ورودی به سیستم به راحتی کنترل می‌شود. شیرهای یک‌طرفه برای جلوگیری از برگشت جریان سیال به سیستم هستند. جریان آب و هوا در بخش اختلاط با یکدیگر مخلوط و جریان دو فاز حاصله وارد بخش آزمایش و سپس وارد مخزن ۲۰۰ لیتری نگهداری آب می‌شود. در مخزن نگهداری، آب و هوا از هم جدا می‌شوند و آب دوباره به داخل سیستم برگشت داده می‌شود. به منظور اختلاط کامل آب و هوا و ایجاد جریان دوفازی بخش اختلاط مطابق شکل ۲ طراحی شده است.

(۱) Ball valve

(۳) Rotameter

(۲) Needle valve

(۴) Check valve



شکل ۳- بخش آزمایش برای خم ۹۰°.

کمپرسور) با تغییرات فشار رفتار متفاوتی از خود نشان می‌دهد و نیز هوا یک سیال تراکم‌پذیر است. از آنجا که طبیعت جریان دوفازی ایجاد شده نوسانی است، باعث نوسان فشار و در نتیجه بروز خطا می‌شود.

اعداد اندازه‌گیری شده نشان می‌دهد که نوسان‌های فشار حدود ۱۰ درصد مقدار متوسط آن است که در نتیجه روی دبی گاز ۱۰ الی ۱۵ درصد و روی دبی مایع کم‌تر از ۵ درصد تاثیر خواهد گذاشت. به علت نوسانات ایجاد شده، افت فشار در مقادیر حداقل، حداکثر و متوسط آن اندازه‌گیری شده است. همچنین به علت وجود شیر و اتصالات تغییرهای موضعی در سطح مقطع ایجاد می‌شود. این امر خود باعث تغییرهای موضعی در الگوی جریان و افت فشار می‌شود. بنابراین آزمایش‌ها در مسیر مستقیم بدون وجود شیر و اتصال انجام شده است. مقایسه نتیجه‌های آن با نتیجه‌های به‌دست آمده نشان می‌دهد که خطاهای فوق از ۵ درصد تجاوز نمی‌کند. در مجموع در اندازه‌گیری‌های به‌دست آمده، خطاهای افت فشار از ۲۰ درصد مقدار متوسط آن تجاوز نخواهد کرد.

### نتیجه‌ها و بحث

#### بررسی افت فشار در خم‌ها

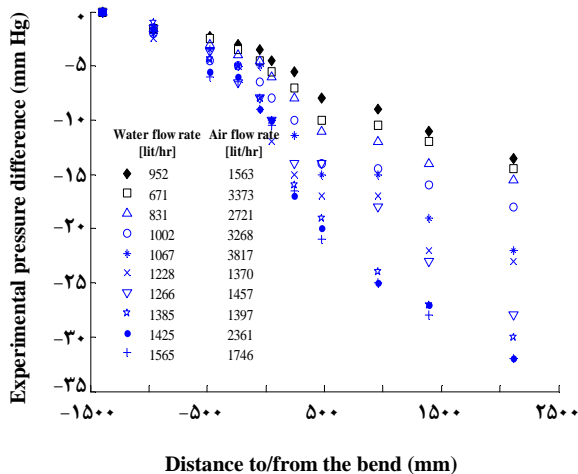
در این آزمایش‌ها به‌منظور بررسی افت فشار در خم‌های ۹۰° و ۱۸۰°، در دبی‌های متفاوت گاز و مایع، افت فشار ۱۰ شیر تعبیه شده روی دستگاه نسبت به شیر مبنا اندازه‌گیری و ثبت شده است. نتیجه‌های حاصل در شکل‌های ۴ و ۵ آورده شده است. در این نمودارها محور افقی بیانگر فاصله شیر شیشه‌ای از خم است و محل قرارگیری خم به‌عنوان مبدا محور در نظر گرفته شده است.

لوله ۱/۵ متری تشکیل شده‌اند. در قسمت ورودی ۵ عدد شیر و در قسمت خروجی ۶ عدد شیر به‌منظور اندازه‌گیری افت فشار در طول لوله قرار داده شده است. قطر سوراخ در محل اتصال شیر به لوله ۲ میلی‌متر است. شکل ۳ تصویر شماتیک بخش آزمایش برای خم ۹۰° است. در این شکل فاصله شیرها از فلنج متصل به خم بر حسب ضریبی از قطر داخلی لوله (d) داده شده و شیرها از شماره ۰ تا ۱۰ شماره‌گذاری شده‌اند. در انجام آزمایش‌های افت فشار، شیر شماره صفر به‌عنوان مبنا انتخاب شده و افت فشار ۱۰ شیر دیگر نسبت به این شیر اندازه‌گیری شده است. در قسمت اتصال از دو نوع خم ۹۰° و ۱۸۰° با قطر ۲/۴ سانتی‌متر استفاده شده است. شعاع انحنای خم ۹۰°، ۳/۶ سانتی‌متر و شعاع انحنای خم ۱۸۰°، ۵/۱ سانتی‌متر است.

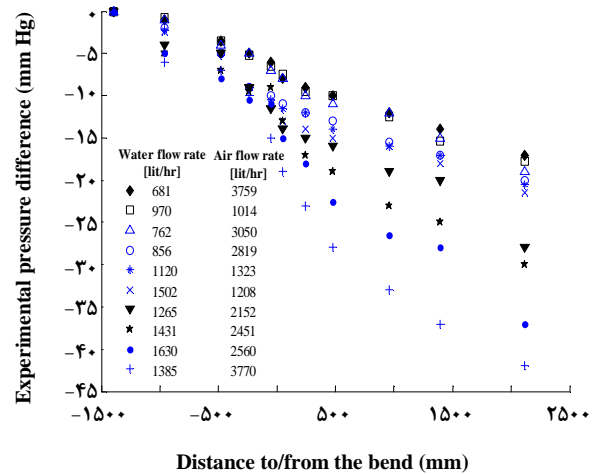
برای اندازه‌گیری افت فشار در سیستم از مانومتر حیوه‌ای استفاده شده است. ارتفاع مانومتر ۴۰ سانتی‌متر و ارتفاع حیوه در آن ۲۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. دقت اندازه‌گیری ۱ میلی‌متر حیوه است.

### روش آزمایش‌ها

آزمایش‌ها در دو بخش انجام شده که در بخش اول تاثیر خم بر افت فشار و در بخش دوم تاثیر آن بر الگوی جریان مورد بررسی قرار گرفته است. در تمامی آزمایش‌ها فشار کم‌تر از ۱ بار و دما  $25 \pm 1$  درجه سانتی‌گراد است. برای اطمینان از نتیجه‌ها و بررسی تکرارپذیری داده‌ها، آزمایش‌های دو الی سه بار تکرار شده است. واضح است که نوسان‌های فشار منتهی به نوسان‌های دبی جرمی آب و هوا می‌شود زیرا، منبع تامین کننده آن (پمپ و



شکل ۵- افت فشار جریان دو فازی در خم ۱۸۰°.



شکل ۴- افت فشار جریان دو فازی در خم ۹۰°.

داده‌های تجربی بر مدل تعیین شده است. بنابراین، مدل ارائه شده برای تعیین افت فشار در خم ۹۰° به صورت زیر است.

$$\phi_{Lo}^2 = A + 10.3 De_{Lo}^{0.499} (1-x)^{0.1} \left( \frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_L} \right)^{0.14} \left( \frac{\mu_L - \mu_G}{\mu_L} \right)^{0.12} \quad (3)$$

همچنین این مدل برای خم ۱۸۰° به صورت زیر است:

$$\phi_{Lo}^2 = A + 0.998 De_{Lo}^{0.395} X^{0.7} (1-x)^{0.1} \left( \frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_L} \right)^{0.14} \left( \frac{\mu_L - \mu_G}{\mu_L} \right)^{0.12} \quad (4)$$

افت فشار جریان تک‌فازی مایع در خم بر اساس روش *Beij* محاسبه می‌شود [۳].

### مقایسه‌ی نتیجه‌های مدل ارائه شده با سایر مدل‌ها

افت فشار خم ۹۰° با مدل‌های *Chisholm* نوع B، *Azzi*، *Paliwoda*، *Sookprasong* و مدل اخیر در شرایط آزمایش‌ها محاسبه شده است. سپس متوسط خطای نسبی هر یک از مدل‌ها در پیش‌بینی مقدارهای افت فشار نسبت به نتیجه‌های تجربی با استفاده از رابطه‌ی (۵) محاسبه و در جدول ۱ آورده شده است.

$$error = \sum \frac{|X_{Measured} - X_{Calculated}|}{X_{Measured}} \times 100 \quad (5)$$

با توجه به نتیجه‌های به دست آمده و با استفاده از روش ترسیمی [۵، ۱۰ و ۱۶] افت فشار ناشی از خم در هر مرحله آزمایش محاسبه شده است.

### مدل سازی افت فشار در خم‌ها

با مطالعه و بررسی معادله‌های بدون بعد ارائه شده برای محاسبه افت فشار در خم‌ها، یک مدل مناسب بر اساس نتیجه‌های تجربی با تابعیت عدد بدون بعد *Dean* ارائه شده است. در این مدل سعی شده تاثیر تمامی عامل‌ها بر افت فشار جریان دوفازی در خم افقی در نظر گرفته شود. عامل‌های موثر بر افت فشار شامل نرخ جریان جرمی کل، کیفیت، نسبت چگالی و گرانشی دوفاز و نسبت انحنای خم می‌باشد. همچنین نیروهای موثر بر جریان افقی، نیروی گریز از مرکز که میل دارد سیال را به خارج از خم فشار دهد و نیروی ویسکوز که از آن جلوگیری می‌کند، هستند. با توجه به مطالب بالا مدلی به صورت زیر برای تعیین افت فشار در خم‌ها ارائه شده است.

$$\phi_{Lo}^2 = A + c_0 De_{Lo}^{c_1} X^{c_2} (1-x)^{c_3} \left( \frac{\rho_L - \rho_G}{\rho_L} \right)^{c_4} \left( \frac{\mu_L - \mu_G}{\mu_L} \right)^{c_5} \quad (1)$$

که در این رابطه:

$$A = (1-x) + (\rho_L K_{Go} / \rho_G K_{Lo}) X^2 \quad (2)$$

و ضریب‌های ثابت با استفاده از روش حداقل مربعات و برازش

جدول ۱- متوسط خطای نسبی هر یک از مدل‌ها نسبت به نتیجه‌های تجربی برای خم ۹۰°.

مدل	متوسط خطا (درصد)
New model	۸٫۹۳
Chisholm	۱۲٫۶۸
Sookprasong	۲۲٫۲۷
paliwoda	۸٫۹۸
Azzi	۵۷٫۵۳

جدول ۲- متوسط خطای نسبی هر یک از مدل‌ها نسبت به نتیجه‌های تجربی برای خم ۱۸۰°.

مدل	متوسط خطا (درصد)
New model	۱۱٫۶۴
Chisholm	۱۱٫۶۶
paliwoda	۲۵
Subbu	۵۸٫۵۹
Usui	۴۸٫۲۱

نتیجه‌های به دست آمده نشان می‌دهد مدل اخیر کم‌ترین خطا را نسبت به مدل‌های دیگر داراست. تفاوت خطاهای مدل‌ها می‌تواند به علت تفاوت شرایط عملیاتی و نوع طراحی دستگاه مورد آزمایش که مدل بر اساس داده‌های تجربی حاصل از آن ارایه شده و همچنین تفاوت در پارامترهای موثر در نظر گرفته شده در هر یک از مدل‌ها باشد. بنابراین، در خم ۹۰°، مدل *Azzi* که بر اساس نتیجه‌های افت فشار خم عمودی ارایه شده، خطای بیشتری در پیش‌بینی افت فشار دارد و مدل *Sookprasong* که دارای خطای ۲۲٫۲۷ درصد است، تنها تاثیر سرعت ظاهری و چگالی گاز و مایع را در محاسبه ضریب تصحیح افت فشار اصطحاکاکی در نظر می‌گیرد. درحالی که در مدل *Paliwoda* تاثیر کیفیت و نسبت چگالی و گرانشی دوفاز و در مدل *Chisholm* تاثیر کیفیت و نسبت انحنای خم نیز در نظر گرفته شده است و ملاحظه می‌شود کیفیت فاز گاز در آزمایش‌ها بالاست.

همچنین افت فشار خم ۱۸۰° با مدل‌های *Chisholm* نوع B، *Usui*، *Subbu*، *Paliwoda* و مدل اخیر در شرایط آزمایش‌ها محاسبه شده و متوسط خطای نسبی هر یک از مدل‌ها در جدول ۲ آورده شده است. مشاهده می‌شود مدل اخیر کم‌ترین خطا را نسبت به مدل‌های دیگر داراست. در خم ۱۸۰° نیز مدل‌های *Usui* و *Subbu* که تاثیر پارامترهای مانند کیفیت را در نظر نمی‌گیرند، دارای خطای بالاتری نسبت به دیگر مدل‌ها هستند.

مدل ارایه شده تاثیر پارامترهای مهم دیگر همچون کیفیت و به‌ویژه نیروی گریز از مرکز را در نظر می‌گیرد و بنابراین قابل پیش‌بینی است که نتیجه‌های بهتری را ارایه کند.

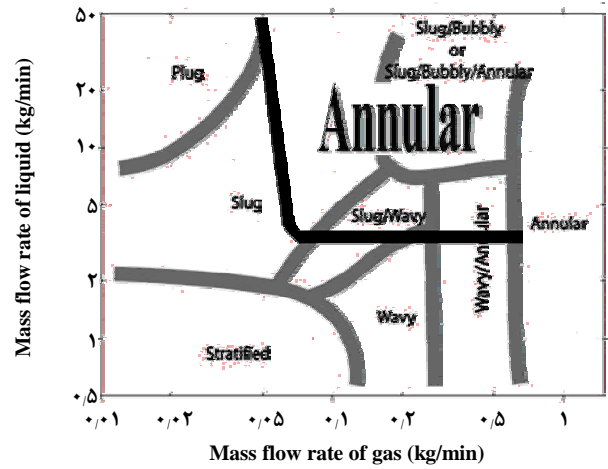
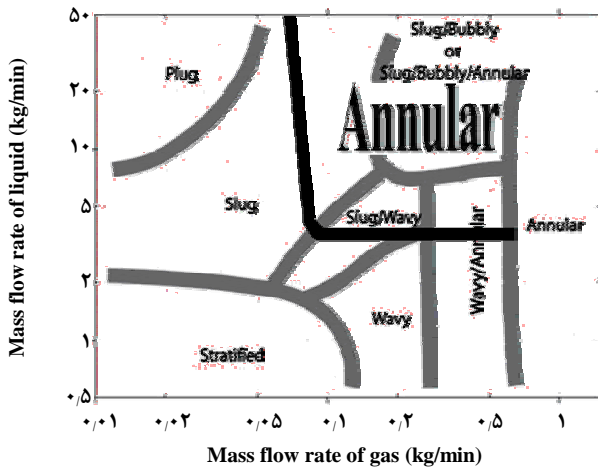
### بررسی الگوی جریان در خم‌ها

در این بخش تاثیر خم ۹۰° و ۱۸۰° بر الگوی جریان دوفازی

با مشاهده آن قبل و بعد از خم در دبی‌های متفاوت آب و هوا مورد بررسی قرار گرفته است. الگوی جریان ایجاد شده در قبل و بعد از خم در هر مرحله بر روی نمودار ارایه شده توسط *Ghajar* [۱۹] برای لوله افقی و مستقیم مشخص شده و تاثیر آن در تغییر الگوی جریان مورد بررسی قرار گرفت. پیش‌بینی الگوی جریان به وسیله نمودار و مشاهدات تجربی در قبل از خم یکسان هستند و این تطابق، درستی نتیجه‌ها این بخش را نشان می‌دهد. با توجه به مشاهدات می‌توان گفت که تغییر الگوی جریان موقتی بوده و پس از طی فاصله‌ای دوباره الگوی جریان در قبل از خم داخل لوله ایجاد می‌شود. در بعد از خم ۹۰° الگوی جریان لخته‌ای - حبابی و لخته‌ای - حبابی - حلقوی مشاهده نمی‌شود و در آن محدوده‌ها الگوی جریان حلقوی ایجاد شده است. الگوی جریان لخته‌ای - موجی به جز در دبی‌های کم مایع مشاهده نشده و جریان مشاهده شده حلقوی می‌باشد. همچنین در محدوده‌ای از جریان لخته‌ای تحت تاثیر خم، الگوی جریان حلقوی ایجاد شده است. می‌توان گفت خم ۹۰° بر الگوی جریان قالبی و لایه‌ای تاثیر ندارد. خم ۱۸۰° تاثیری مشابه بر الگوی جریان دارد با این تفاوت که خم ۹۰° دارای تاثیر بیشتری بر الگوی جریان نسبت به ۱۸۰° است. علت این موضوع کم‌تر بودن نسبت انحنای خم ۹۰° در مقایسه با ۱۸۰° می‌باشد که باعث ایجاد نیروی گریز از مرکز بزرگ‌تر و اغتشاش بیشتر جریان دو فازی و در نتیجه تغییر بیشتر الگوی جریان می‌شود.

### ارایه نمودار الگوی جریان با در نظر گرفتن تاثیر خم








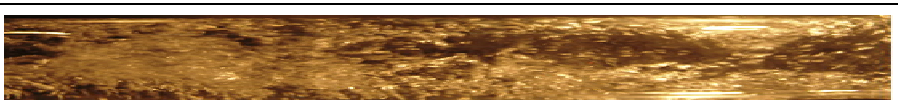
در این قسمت بر اساس آزمایش‌های انجام شده نمودار الگوی جریان با در نظر گرفتن تاثیر خم ۹۰° و ۱۸۰° (شکل‌های ۶ و ۷) ارایه می‌شود. همچنین تصویرهایی از الگوی جریان، مشاهده شده در حین انجام آزمایش‌ها نیز به پیوست ارایه می‌شود.



شکل ۷- نمودار الگوی جریان با نظر گرفتن تاثیر خم  $180^\circ$   $d=2.4$  cm و  $(R/d= 2,1)$ .

شکل ۶- نمودار الگوی جریان با نظر گرفتن تاثیر خم  $90^\circ$   $d=2.4$  cm و  $(R/d= 1,5)$ .

جدول ۳- الگوهای جریان مشاهده شده.

تصویرهای الگوی جریان مشاهده شده	نوع الگوی جریان
	موجی
	قالبی
	لایه‌ای
	لخته‌ای
	حبابی - لخته‌ای
	موجی - لخته‌ای
	حلقوی - حبابی - لخته‌ای
	حلقوی

		<b>نتیجه گیری نهایی</b>
Re	عدد رینولدز	
De	عدد Dean	در این پژوهش تاثیر خم‌های ۹۰° و ۱۸۰° بر افت فشار و
K	ضریب افت فشار خم در جریان تک‌فازی	الگوی جریان دوفازی در داخل لوله صاف با قطر داخلی ۲/۴
x	کیفیت	سانتی‌متر مورد بررسی قرار گرفت که نتیجه‌های آن به شرح زیر
X	پارامتر لوچارت - مارتینلی	است:
		۱- مدل ارایه شده برای خم‌های ۹۰° و ۱۸۰° خطای کم‌تری
		را نسبت به مدل‌های دیگر دارد و بنابراین، مدل مناسبی برای
$\phi$	ضریب تصحیح افت فشار اصطکاکی	پیش‌بینی افت فشار در هر دو خم است. در این مدل، تمامی
$\rho$	چگالی	پارامترهای موثر بر افت فشار در نظر گرفته شده است.
$\mu$	گرانروی	۲- در دی‌های بالای گاز و مایع، به دلیل وجود نیروی گریز از
		مرکز، الگوی جریان در بعد از خم به حلقوی تبدیل می‌شود.
		۳- خم ۹۰° تاثیر بیشتری بر الگوی جریان نسبت به ۱۸۰°
		دارد که علت آن کم‌تر بودن نسبت انحنای آن در مقایسه با خم
b	خم	۱۸۰° است.
L	مایع	۴- بر اساس نتیجه‌های حاصل، برای پیش‌بینی الگوی جریان
Lo	تمام سیال با ویژگی‌های فیزیکی فاز مایع	بعد از خم ۹۰° و ۱۸۰° نمودار ارایه شده توسط Ghajar اصلاح
G	گاز یا بخار	شده است.
Go	تمام سیال با ویژگی‌های فیزیکی فاز گاز یا بخار	

**فهرست علائم**

d	قطر داخلی لوله
R	شعاع انحنای خم

تاریخ دریافت: ۱۵/۹/۲۶ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۶/۱/۲۷

**مراجع**

- [1] Ito, H., Flow in Curved Pipes, *JSME Int. J.*, **30**, 543 (1987).
- [2] Dean, W.R., Note on the Motion of Fluid in Curved Pipe, *Phil. Mag.* **4**, 208 (1927).
- [3] Beij, KH., Pressures Losses for Fluid Flow in 900 Bends, *J. Research National Bureau of Standards*, **21**, 1 (1938).
- [4] Miller, DS., Internal Flow Systems, *BHRA Fluid Engineering*, **5** (1978).
- [5] Azzi, A., Friedel, L., Kibboua, R., Shannak, B., Reproductive Accuracy of Two-Phase Flow Pressure Loss Correlations for Vertical 90° Bends, *Forschung im Ingenieurwesen*, **67**, 109 (2002).
- [6] Azzi, A., Alger, U.S.T.H.B., Friedel, L., Two-Phase Upward Flow 90° Bend Pressure Loss Model, *Forschung im Ingenieurwesen*, **69**, 120 (2005).
- [7] Sekoguchi, K., Sato, Y., Karayasaki, A., The Influence of Mixers, Bends and Exit Section on Horizontal Two-Phase Flow, *Int. Symp. on Res. in Cocurrent Gas Liquid flow.*, Univ. of Waterloo, Canada, **1**, (1968).
- [8] Sekoda, G., Sato, K., Kayasaki, T., Horizontal Two-Phase Air- Water Flow Characteristics in the Disturbed Region Due to 90° Bend, *Soc. Mech. Engrs.*, **35**, (1969).



- [9] Fitzsimmons, DE., Two-Phase Pressure Drop in Piping Components, Report Hanford Laboratories, HW-80970, Rev. 1, (1964).
- [10] Chisholm, D., "Two-Phase Flow in Pipelines and Heat Exchangers", Godwin, G., (1983).
- [11] Mandal, S.N., and Das, S.K., Pressure Losses in Bends During Two-Phase Gas-Newtonian Liquid Flow, *Ind. Eng. Chem. Res.*, **40**, 2340 (2001).
- [12] Sookprasong, P., "Two-Phase Flow in Piping Components", PhD Thesis, University of Tulsa, USA (1980).
- [13] Paliwoda, A., Generalized Method of Pressure Drop Calculation Across Pipe Component Containing Two-Phase Flow of Refrigerants, *Rev. Int. Froid*, **15**(2), 120 (1992).
- [14] Subbu, S.K., Das, S.K., Biswas, M.N., Mitra, A.K., Pressure Drop in U-Bends for Air- Water Flow, *Int. J. Eng. Fluid Mech.*, **3**, 239 (1990).
- [15] Usui, K., Aoki S, I.A., Flow Behaviour and Pressure Drop of Two-Phase Flow Through C-Shaped Bend in Vertical Plane, (I) Upward flow, *J. Nucl. Sci. Technol.*, **17**, 875 (1980).
- [16] Azzi, A., Friedel, L., Belaadi, S., Two-Phase Gas/Liquid Flow Pressure Loss in Bends, *Forschung im Ingenieurwesen*, **65**, 309 (2000).
- [17] Wang, C.C., Chen, I.Y., Yang, Y.W., Hu, R., Influence of Horizontal Return Bend on the Two-Phase Flow Pattern in Small Diameter Tubes, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **28**, 145 (2004).
- [18] Wang, C.C., Chen, I.Y., Yang, Y.W., Chang, Y.J., Two-Phase Flow Pattern in Small Diameter Tubes with the Presence of Horizontal Return Bend, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **46**, 2975 (2003).
- [19] Ghajar, A.J., Two-Phase Heat Transfer in Gas- Liquid Non- Boiling Pipe Flows, 3<sup>rd</sup> International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, 21-24 June, Capetown, South Africa (2004).