

## بررسی عددی جریان نا آرام در خم نود درجه نوسان کننده

الهام عامری<sup>۱</sup>، محسن نصر اصفهانی<sup>۲\*</sup>

اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی شیمی، صندوق پستی ۸۴۱۵۶

**چکیده:** در این پژوهش، جریان درهم هوا در خم ۹۰ درجه در ۲ حالت ساکن و متحرک با دو سرعت نوسانی گوناگون به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفت. مسئله‌های مورد بررسی با استفاده از مدل  $k-\epsilon$  با تصحیح دیواره (تابع یونیورسال دیواره) و با کاربرد نرم افزار فلوئنت شبیه سازی شد. به منظور راستی آزمایی روش تحلیلی، مسئله برای خم ساکن با مشخصات آزمایشگاهی موجود شبیه سازی گردید و با نتیجه‌های تجربی مقایسه شد. نتیجه‌های حل عددی و نتیجه‌های تجربی تطابق خوبی داشت. کانتورهای سرعت برای خم ساکن و کانتورها بردارهای سرعت و کانتورهای فشار ایستا برای خم متحرک، در سطح مقاطع گوناگون خم ارایه شده است. در سطح مقطع ورودی خم به علت وجود نیروی گریز از مرکز جریان‌های جدیدی موسوم به جریان‌های ثانویه به وجود آمده و این جریان‌ها مرکز پروفیل‌های سرعت را به سمت دیواره داخلی خم منحرف می‌سازند. این جریان‌ها در طول خم رشد کرده و در سطح مقطع ۶۰ درجه به علت کاهش اثر خم، مرکز پروفیل‌های سرعت در مرکز خم دیده می‌شود. همچنین روند تغییرهای سرعت محوری در خم ساکن و متحرک یکسان است.

**واژه‌های کلیدی:** خم، شبیه‌سازی، نوسان، جریان نا آرام، زانویی.

**KEY WORDS:** Bend, Simulation, Oscillation, Turbulent flow, Elbow.

### مقدمه

به پژوهش جهت ارایه مدل‌های درهم، کارهای آزمایشگاهی برای شناخت پدیده فیزیکی در جریان درهم در درون خم‌ها با جزئیات کامل مورد توجه قرار گرفته‌اند. بر خلاف هندسه بسیار ساده، جریان در لوله‌های خمیده به دلیل ایجاد چرخش و انحنای خطوط جریان از پیچیدگی‌های ویژه‌ای برخوردار است. یکی از مشخصه‌های مهم جریان در داخل لوله‌های خمیده، جریان ثانویه موجود در مقطع عمود بر محور خم به علت وجود نیروی گریز از مرکز می‌باشد. نیروی گریز از مرکز، سیال را از مرکز لوله به سمت خارج خم منحرف کرده و باعث ایجاد گرادیان فشاری می‌شود، که به سمت داخل خم جهت می‌گیرد. این گرادیان فشار در سطح مقطع خم به تقریب

جریان در لوله‌های خمیده، در دستگاه‌های گوناگون مهندسی مانند مجموعه لوله‌کشی و وسایلی چون مبدل‌ها و موتورهای گرمایی دیده می‌شود. به عنوان کاربردهای تازه‌تر می‌توان به افزایش انتقال جرم توسط جریان ثانویه ایجاد شده در لوله‌های انتقال دهنده خون و کلیه‌های مصنوعی اشاره کرد، که در زمان‌های اخیر پژوهش‌های گسترده‌ای را به خود اختصاص داده‌اند [۱، ۲]. از آنجایی که این گونه جریان‌ها اغلب درهم هستند، پژوهش گسترده‌ای روی جریان درهم در لوله‌های خمیده به وسیله اندازه‌گیری‌های افت فشار و اندازه‌گیری‌های سرعت انجام گرفته است [۳]. در سال‌های اخیر با پیشرفت در ساختن وسایل اندازه‌گیری و همچنین نیاز

\*E-mail: mnasr@cc.iut.ac.ir

\*عهده دار مکاتبات

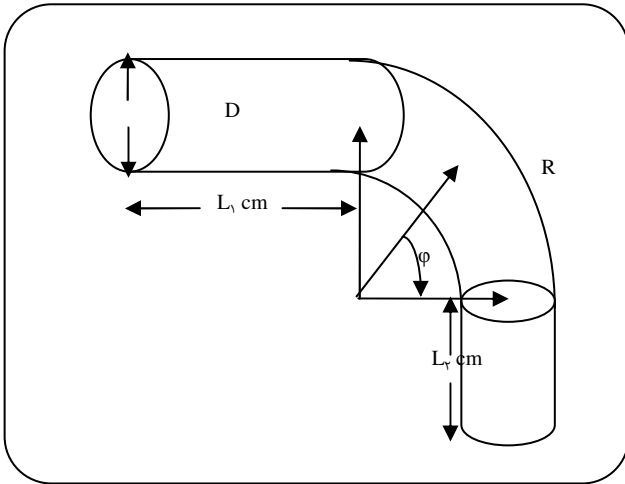
<sup>۱</sup>نشانی فعلی: شهرضا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرضا، گروه مهندسی شیمی، صندوق پستی ۸۶۱۴۵

جدول ۱- مراتب حل مسئله.

مرتبه شبییه‌سازی	سرعت متوسط ورودی m/s	عدد رینولدز	فرکانس
۱	۱۰٫۹۷	۳۱۲۰۰	۰
۲	۱۰٫۹۷	۳۱۲۰۰	۱
۳	۱۰٫۹۷	۳۱۲۰۰	۲

جدول ۲- مشخصات هندسی مسایل شبیه‌سازی شده.

ردیف	D (cm)	L <sub>۱</sub> (cm)	L <sub>۲</sub> (cm)	R (cm)
۱	۱۰٫۴	۱۰۴۰	۴۱۶	۲۰٫۸
۲	۱۰٫۶	۶۷	۴۰	۱۶



شکل ۱- ساده شده تصویر هندسی دستگاه.

برای مدل کردن تنش رینولدز از مدل  $k-\epsilon$  با تصحیح دیواره (تابع یونیورسال دیواره) استفاده می‌شود. انرژی جنبشی اغتشاش

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (3)$$

اتلاف اغتشاش

$$\rho \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} \cdot \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

کوتاه پژوهشی

یکنواخت بوده و بر خلاف سرعت محوری دارای تغییر زیادی نیست [۴]. با توجه به تغییر سرعت محوری در یک مقطع، نیروی گریز از مرکز ناشی از این سرعت‌های محوری نیز تغییر کرده و به‌نظر می‌رسد که در ناحیه مرکزی لوله بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده که با گرادیان فشار در تعادل است. در ناحیه‌های نزدیک دیواره‌ها سرعت سیال کاهش یافته و گرادیان فشار بر نیروی گریز از مرکز غلبه می‌کند. بنابراین سیال در جهت بالا و پایین، به موازات دیواره لوله شروع به حرکت کرده و موجب ایجاد جریانی می‌شود که از دیواره خارجی شروع و به دیواره داخلی ختم می‌شود. به این جریان ایجاد شده، جریان ثانویه می‌گویند. جریان ثانویه تأثیر قابل توجهی بر روی توزیع سرعت داخل خم دارد. آزمایش‌هایی برای تعیین اثر جریان ثانویه بر توزیع سرعت در خم انجام شده است [۴، ۵]. اما در مورد اثرهای نوسان و ارتعاشاتی که در اثر جریان درهم داخل لوله، عملکرد پمپ‌ها یا کمپرسورها بر جریان ثانویه و توزیع سرعت داخل خم ایجاد می‌شود اطلاعاتی در دست نیست. بنابراین هدف از این پژوهش، تحلیل عددی جریان درهم هوا در زانویی ۹۰ درجه سه بعدی، در حالت ساکن و نوسانی است. بدین منظور ابتدا معادلات مربوط به جریان در خم ساکن حل شده و نتیجه‌های به‌دست آمده با نتیجه‌های آزمایشگاهی [۳] مقایسه و راستی‌آزمایی می‌شود. سپس معادله‌ها برای خم ساکن در حال نوسان در دو حالت حل شده و تأثیر نوسان خم بر روی توزیع جریان داخل خم مورد بررسی قرار می‌گیرد. مراتب حل مسئله در جدول ۱ ارایه شده است. هندسه مسئله‌های بررسی شده در این مقاله مطابق با شکل ۱ بوده و مشخصات هندسی مسئله‌های شبیه‌سازی شده در جدول ۲ ارایه شده است. ردیف اول و دوم این جدول به ترتیب مربوط به مسئله درستی آزمایشی (با هندسه به‌کار رفته در کار آزمایشگاهی گزارش شده [۳]) و مسئله اصلی (هندسه مشابه با دستگاه آزمایش به‌کارگرفته شده در پژوهش پیشین [۶]) می‌باشد.

## بخش نظری

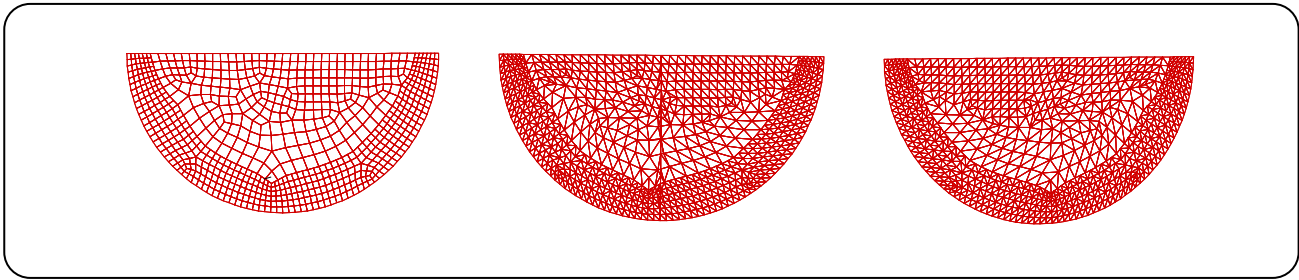
### معادلات حاکم و شرایط مرزی

در حل مسئله مطرح شده در این مقاله دسته معادله‌های پیوستگی و ناویر استوکس برای سیال تراکم ناپذیر هوا حل می‌شوند:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{Du}{Dt} = \mu \nabla^2 u - \nabla p + \rho g \quad (2)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} = \mu \nabla^2 v - \nabla p + \rho g, \quad \rho \frac{Dw}{Dt} = \mu \nabla^2 w - \nabla p + \rho g$$



شکل ۲- نوع شبکه بندی به کاررفته در حل مسئله‌ی شبیه‌سازی شده، (الف) در ورودی لوله، (ب) در سطح مقطع ورودی خم، (ج) در سطح مقطع خروجی لوله خروجی.

مقدارهای سرعت  $u$  و  $w$  نیز بر حسب متر بر ثانیه بیان شده‌اند. شبکه‌بندی بدون سازمان شش‌وجهی برای حل استفاده می‌شود. نوع شبکه‌بندی در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل، قسمت (الف) مش بندی سطح مقطع لوله صاف ورودی، قسمت (ب) مش بندی در سطح مقطع ورودی خم و قسمت (ج) مش بندی در سطح مقطع ورودی لوله خروجی را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، به علت بالا بودن تغییرهای سرعت در ناحیه‌های نزدیک دیواره، ناحیه مورد حل عددی مجاور دیواره ریزتر شبکه بندی شده است. چگونگی مش بندی در لوله صاف ورودی به این صورت است که نخست سطح مقطع ورودی لوله مش بندی شده و سپس شبکه بندی حجم لوله بر اساس مش بندی این صفحه انجام می‌شود. در مش بندی خم نیز همین روند تکرار شده و مش بندی حجم خم بر اساس مش بندی صفحه ورودی خم ادامه می‌یابد. در سطح مقطع خروجی خم نیز مش بندی حجم لوله بر اساس مش بندی صفحه ورودی لوله خروجی انجام می‌شود. شبکه بندی توسط نرم افزار گمبیت انجام شده است. در این بررسی شبکه مورد نظر دارای  $3 \times 57401$  نقطه محاسباتی است.

### روش حل عددی و گسسته‌سازی

برای حل عددی معادلات حاکم از روش SIMPLE و گسسته‌سازی بر مبنای حجم محدود موجود در نرم افزار فلوئنت استفاده شده است. حل طبق مراحل زیر انجام می‌شود:

- ۱- تقسیم بندی ناحیه حل به حجم‌های کنترل مجزا
- ۲- انتگرال گیری از معادلات پایداری و به دست آوردن معادله‌های جبری برای متغیرهای وابسته مانند سرعت‌ها، فشار، و کمیت‌های اسکالر.
- ۳- خطی سازی معادله‌های گسسته شده و حل معادله‌های خطی شده.

در این بررسی در ابتدا مسئله با شبکه بندی اولیه حل شد. سپس به منظور بررسی استقلال جواب‌های به دست آمده، مسئله

ثابت‌های به کار رفته در این معادله‌ها عبارتند از:

$$\sigma_\varepsilon = 1/3, \quad \sigma_k = 1, \quad C_\mu = 0.09, \quad C_{\varepsilon 2} = 1.92, \\ C_{\varepsilon 1} = 1.44$$

ویسکوزیته درهم نیز به وسیله رابطه زیر به پارامترهای  $k$  و  $\varepsilon$  وابسته می‌شود.

$$\mu_T = \rho \cdot c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

شرایط مرزی برای مسایل مورد بررسی در این مقاله به صورت زیر نوشته می‌شود:

در ورودی لوله بالادست زانویی سرعت محوری یکنواخت  $8.7$  متر بر ثانیه، برای مسئله راستی آزمایی و  $10.97$  متر بر ثانیه برای مسئله‌های ۱، ۲ و ۳ به عنوان شرط مرزی استفاده شده است.

شرط مرزی روی دیواره عبارت است از:

برای خم ساکن:

$$u(R, \theta, z) = v(R, \theta, z) = w(R, \theta, z) = 0, \quad \theta = 0, \pi$$

در مسئله دوم، برای زانویی تحت نوسان با فرکانس ۱

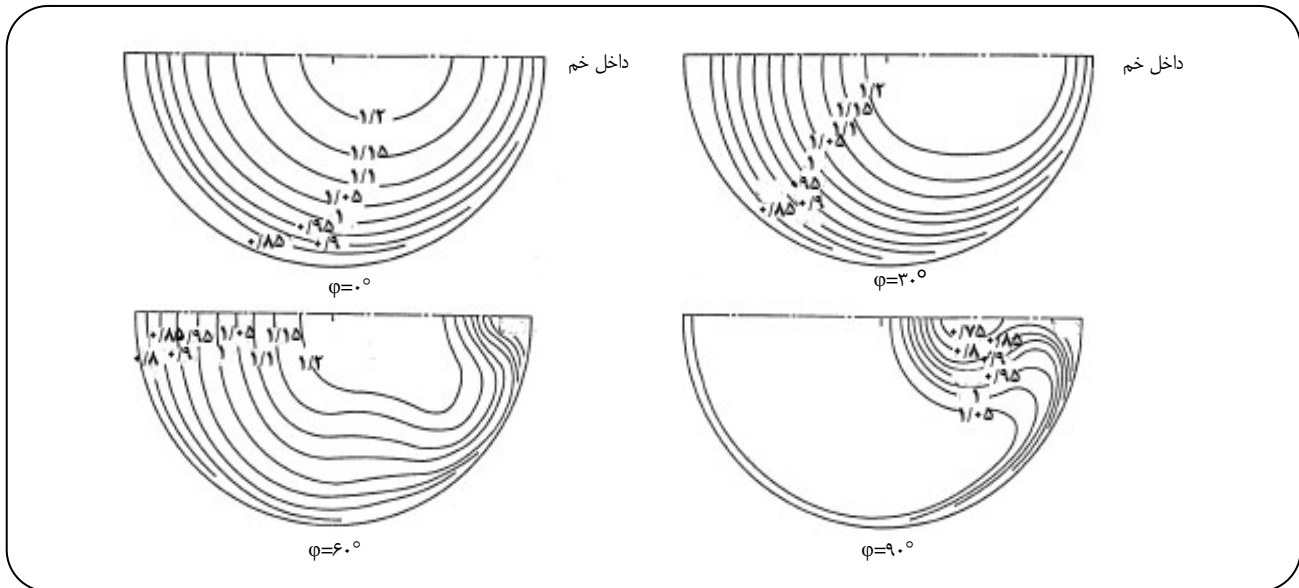
$$u(r, \theta, 0) = 0, \quad \begin{cases} t < T/2 & v(R, \theta, z) = 29 \text{ mm/s} \\ t > T/2 & v(R, \theta, z) = -29 \text{ mm/s} \end{cases}$$

در مسئله سوم خم متحرک با فرکانس دو

$$u(r, \theta, 0) = 0, \quad \begin{cases} t < T/2 & v(R, \theta, z) = 41 \text{ mm/s} \\ t > T/2 & v(R, \theta, z) = -41 \text{ mm/s} \end{cases}$$

$$\frac{\partial v(r, \theta, z)}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial w(r, \theta, z)}{\partial \theta} = 0, \quad \frac{\partial u(r, \theta, z)}{\partial \theta} = 0.$$

با توجه به تقارن در صفحه افقی گذرنده از محور لوله ورودی، خروجی و خم شرط مرزی روی این صفحه به صورت زیر نوشته می‌شود. که  $u$ ،  $v$ ،  $w$  همان سرعت‌های تعریف شده در حالت اول می‌باشند.



شکل ۳- کانتورهای سرعت بی بعد در مقاطع گوناگون خم [۳].

سرعت به دست آمده از حل شبیه سازی با مقدار عددی ۱/۲ در شکل ۴ ناحیه کمتری را تحت پوشش خود قرار داده اند، به طور کلی بررسی نتیجه های در این سطح مقطع نشان می دهد که کانتورهای سرعت به دست آمده از حل شبیه سازی بیشتر به سمت ناحیه داخلی خم منحرف می شوند.

در سطح مقطع ۳۰ درجه در هر دو شکل ۳ و ۴ سیال با سرعت محوری تندی نزدیک دیواره داخلی خم حرکت کرده و در این ناحیه عدد های بی بعد یکسانی برای سرعت محوری در هر دو شکل دیده می شود. مقایسه نتیجه های به دست آمده از دو روش آزمایشی و شبیه سازی نشان می دهد که انحراف کانتورهای سرعت به دست آمده از حل شبیه سازی به سمت ناحیه داخلی خم بیشتر است. در سطح مقطع ۶۰ در شکل ۴، سیال با سرعت بالاتر از سرعت متوسط ورودی در حدود ۱/۱۴ تا ۱/۱ برابر سرعت ورودی نزدیک دیواره داخلی، به وسیله جریان ثانویه به سمت دیواره خارجی منتقل می شود و در عوض سیال با سرعت کمتر از سرعت متوسط ورودی نزدیک دیواره بالایی و پایینی توسط جریان ثانویه به سمت دیواره داخلی جابه جا می شود. این روند در سطح مقطع ۶۰ در شکل ۳ نیز دیده می شود و تا زمانی که فشار در این موقعیت نزدیک دیواره داخلی در جهت محوری افزایش می یابد، حرکت سیال نزدیک دیواره داخلی شروع به کند شدن می کند، ولی در این شکل تشکیل زبانه های سرعت و کشیده شدن این زبانه ها به سمت دیواره داخلی خم نسبت به نتیجه های شبیه سازی

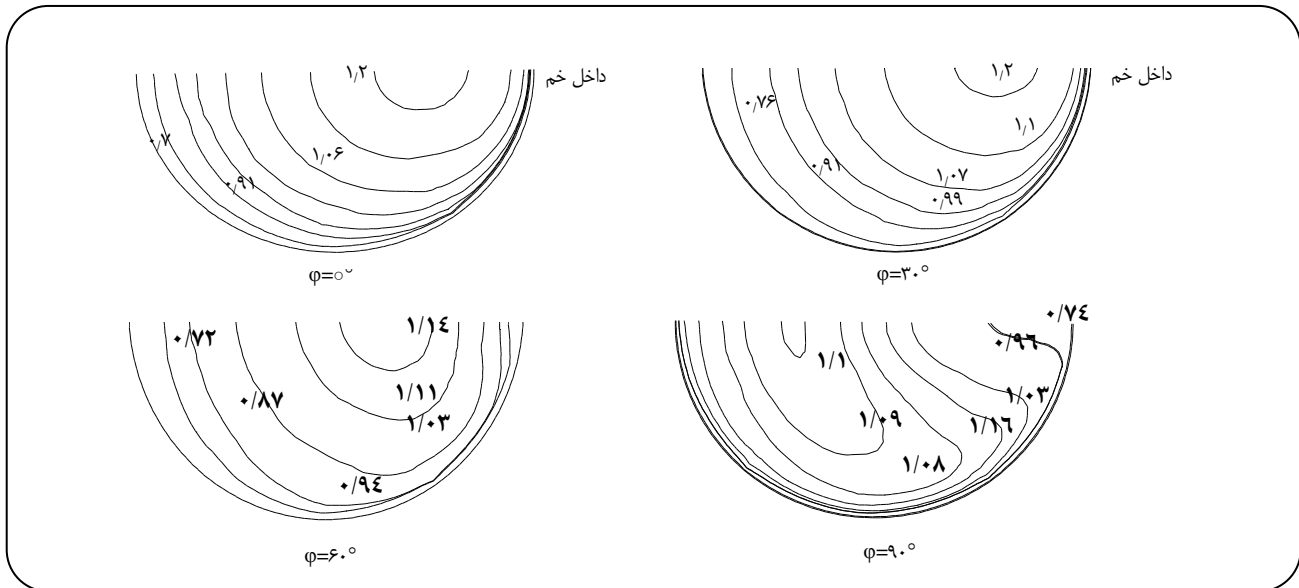
با شبکه بندی ریزتر دوباره شبیه سازی شد. جواب های به دست آمده از دو حل به صورت سرعت متوسط محوری به شکل کانتور مقایسه شد و پس از اطمینان از استقلال جواب ها نسبت به شبکه بندی سامانه پاسخ ها گزارش شدند.

#### راستی آزمایی روش حل عددی

برای اطمینان از درستی حل عددی، سامانه مورد مطالعه در مرجع [۳] که شامل نتیجه های آزمایشگاهی است، شبیه سازی شد.

#### مقایسه نتیجه های حل عددی و نتیجه های آزمایشگاهی [۳]

شکل ۳ نمودارهای میدان سرعت متوسط سیال به دست آمده از نتیجه های آزمایشگاهی مرجع [۳] را در مقطع های ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه ای خم نشان می دهد. شکل ۴ نمودارهای به دست آمده از شبیه سازی میدان سرعت سیال درون خم ۹۰ درجه ای ساکن در مقطع های ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه با شرایط هندسی و سینماتیکی مشابه با شرایط آزمایشی در مرجع [۳] می باشد. همان طور که در صفحه ورودی خم، در شکل های ۳ و ۴ دیده می شود، مقدار سرعت سیال در دیواره داخلی خم بر اثر گرادیان فشار اولیه موجود در جهت محوری، افزایش یافته و همزمان با این پدیده نیز حرکت سیال در قسمت دیواره خارجی، بر اثر گرادیان فشار موجود کند می شود، که این پدیده دلیل بر ایجاد جریان ثانویه در سطح مقطع عرضی ورودی است. در این سطح مقطع، کانتورهای



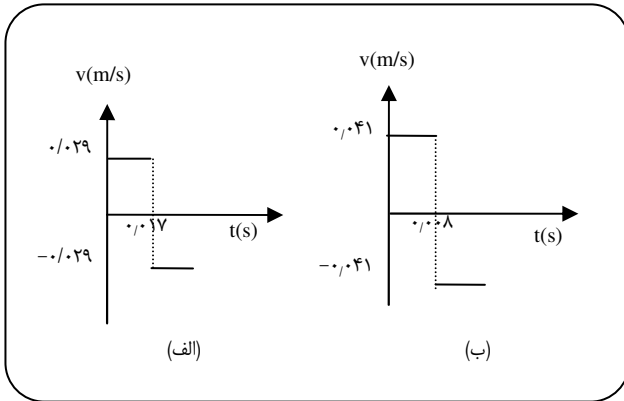
شکل ۴- کانتورهای سرعت بی بعد در مقاطع گوناگون خم ساکن با سرعت ورودی ۸/۷ متر بر ثانیه.

پیدا می‌کنند. در سطح مقطع ۹۰ درجه بیشترین تشابه هم از لحاظ موقعیت و هم از لحاظ مقدار عددی در کانتورهای سرعت دیده می‌شود. با توجه به این نتیجه‌ها و وجود شباهت‌ها بین حل عددی و نتیجه‌های آزمایشگاهی می‌توان از کد تهیه شده برای حل مسئله زانویی نوسان کننده استفاده نمود. برای هندسه نمایش داده شده در شکل ۵ در سه حالت زانویی ساکن، نوسانی با فرکانس ۱ و نوسانی با فرکانس ۲ حل شبیه‌سازی ارایه می‌شود.

در مسئله‌های شماره ۲ و ۳ هنگامی که خم با سرعت تعریف شده در جهت عمود بر راستای جریان که موازی افق است، به سمت بالا حرکت می‌کند، سرعت نوسان دستگاه برابر با مقدار ۲۹ میلی متر بر ثانیه با علامت مثبت است، و زانویی در طی مدت زمانی که مسافت پیموده شده از مکان اولیه تا بالاترین موقعیت ممکن را در طول زمان نیم دور طی می‌کند، دارای این سرعت است. این مقدار سرعت به عنوان سرعت اولیه در کد مورد نظر تعریف می‌شود.

در ادامه‌ی این حرکت، هنگامی که زانویی به بالاترین نقطه‌ی دامنه‌ی حرکت خود رسید، زانویی بقیه‌ی مسافت را با مقدار سرعت ۲۹ میلی‌متر بر ثانیه، ولی این بار با علامت منفی به مکان اولیه خود طی می‌کند. این سرعت با علامت منفی، پس از پایان حل مسئله در شده و انجام محاسبات توسط کامپیوتر با سرعت ۲۹- میلی‌متر بر ثانیه قسمت اول با سرعت با علامت مثبت ۲۹ میلی‌متر بر ثانیه، در قسمت شرایط مرزی برای کد مورد نظر تعریف متر بر ثانیه تا پایان زمان یک دور کامل ادامه می‌یابد.

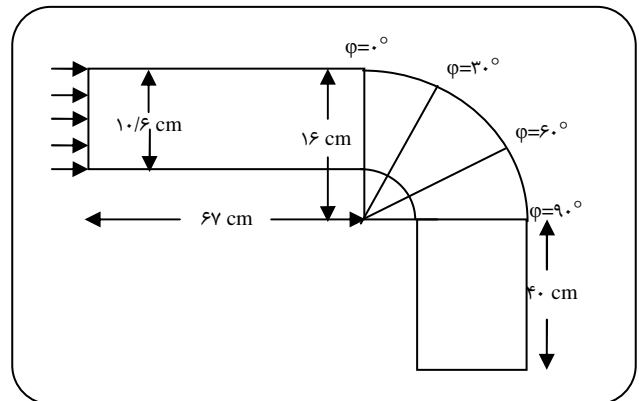
بیشتر دیده می‌شود. در سطح مقطع ۹۰ در شکل‌های ۳ و ۴ جریان ثانویه، به سرعت رشد می‌کند. بعد از این جریان اولیه با سرعت بالا، تحت تأثیر جریان قوی ثانویه به سمت دیواره خارجی خم حرکت می‌کند. در این سطح مقطع در هر دو شکل ۳ و ۴ انحراف کانتورهای زبانه‌ای شکل سرعت به سمت دیواره داخلی خم مشهود بوده و عددهای بی‌بعد سرعت گزارش شده در شعاع‌های یکسان تطابق خوبی دارند. به عنوان مثال در هر دو شکل کانتور نسبت داده شده به سرعت بی‌بعد با مقدار ۱ از نواحی مرکزی خم شروع شده و پس از متمایل شدن به سمت دیواره داخلی خم در ناحیه خارجی خم پایان یافته و مشابه با همین روند را کانتورهای با سرعت کمتر نیز تکرار می‌کنند. در کل از مقایسه نتیجه‌های آزمایشگاهی [۳] و حل عددی می‌توان به نتیجه‌های زیر دست یافت. در سطح مقطع‌های ۰ و ۳۰ درجه انحراف کانتورهای سرعت به سمت دیواره داخلی خم در حل شبیه‌سازی محسوس تر بوده و کانتورهای سرعت با مقدار عددی کمتر از ۰/۹ در نتیجه‌های به‌دست آمده از حل شبیه‌سازی و آزمایشگاهی موقعیت یکسانی در داخل خم داشته ولی برای کانتورهای سرعت از حل شبیه‌سازی با مقدار عددی بزرگتر از ۰/۹ و به‌ویژه بزرگتر از ۱ نواحی با گستردگی کمتر و نزدیکتر به ناحیه داخلی خم را اشغال کرده‌اند. در سطح مقطع ۶۰ نیز انحراف زبانه‌ای شکل سرعت در نتیجه‌های شبیه‌سازی دیده نشده و کانتورهای سرعت در نواحی مرکزی و نواحی نزدیک دیواره در حل شبیه‌سازی به ترتیب مقدارهای عددی بیشتر و کمتری را



شکل ۶- نوسان در یک پرید (الف) در فرکانس ۱/۴۶ هرتز (ب) در فرکانس ۲/۹۳ هرتز.

بالاتری نسبت به قبل به سمت دیواره‌ی داخلی خم شتاب گرفته و رفته رفته در قسمت پایین کانتورهای سرعت به سمت دیواره‌ی خارجی خم منحرف می‌شوند، تا در سطح مقطع ۹۰ درجه بر اثر وجود جریان‌های ثانویه شکل کانتورهای سرعت در ناحیه‌ی مرکزی این پروفیل‌ها به شکل زبانی تغییر شکل یافته و سر این زبانه‌ها به سمت دیواره‌ی داخلی خم کشیده می‌شوند. همچنین در داخل کانتورهای زبانی شکل، پروفیل‌های سرعت به صورت منحنی‌های بسته ظاهر می‌شوند. نتیجه‌ی دیگری که در این سطح مقطع از مشاهده‌ی نمودارها به دست می‌آید این است که شکل کانتورهای سرعت در سطح مقطع ۹۰ درجه، نسبت به کانتورهای سرعت در سطح مقطع‌های قبلی بیشتر تغییر شکل یافته و اثر خم وجود جریان‌های ثانویه در سطح مقطع خروجی خم بیشتر دیده می‌شود.

در شکل ۸ کانتورهای سرعت در مقطع‌های ۰ و ۳۰ و ۶۰ و ۹۰ درجه داخل خم متحرک نمایش داده شده‌اند. سرعت نوسان درجه‌ی عمود بر محور لوله در حال نوسان برابر با ۲۹ میلی‌متر بر ثانیه است. در شکل ۹ کانتورهای سرعت در مقاطع ۰ و ۳۰ و ۶۰ و ۹۰ درجه داخل خم متحرک نمایش داده شده‌اند. سرعت نوسان در جهت عمود بر محور لوله در حال نوسان برابر با ۴۱ میلی‌متر بر ثانیه است. از مشاهده‌ی شکل‌های ۷ الی ۹ این نتیجه به دست می‌آید. که مقادارهای سرعت محوری در چهار سطح مقطع عرضی واقع در طول خم متحرک با فرکانس ۱ نسبت به مقادارهای سرعت محوری در خم ثابت زیادتر هستند. ولی مقادارهای سرعت محوری، با افزایش فرکانس تا ۲/۹۳ هرتز در حدود دو برابر فرکانس نوسان حالت اول، نه تنها افزایش پیدا نکرده بلکه از مقادارهای سرعت محوری



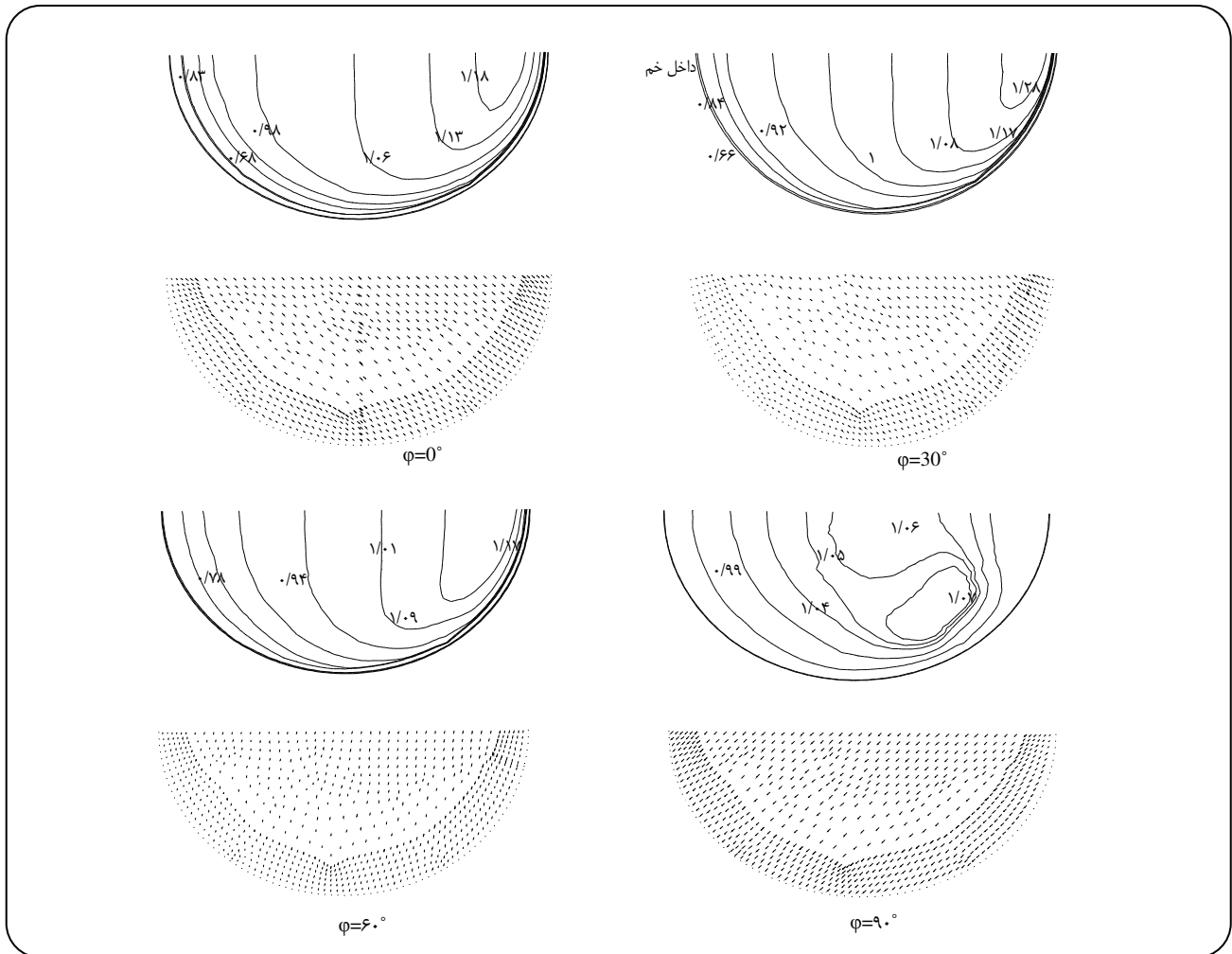
شکل ۵ - نمایش تصویر از بالای خم و سطح مقطع‌های ایجاد شده در طول زانویی.

نمودار سرعت نوسان در زمان یک دوره تناوب در شکل ۶ نشان داده شده است.

### تحلیل نتایج‌های به دست آمده از شبیه‌سازی میدان سرعت در خم ثابت و تحت نوسان

شکل ۷ کانتورها و میدان سرعت را در زانویی ثابت در مقطع‌های ۰ و ۳۰ و ۶۰ و ۹۰ درجه در داخل خم نشان می‌دهند. در هر شکل قسمت راست نمایانگر سطح داخلی و سمت چپ نمایانگر سطح خارجی خم می‌باشد. سرعت جریان یکنواخت ورودی در جهت محور لوله برابر با ۱۰/۹۷۴ متر بر ثانیه است.

شایان ذکر است که این تحلیل‌ها در مورد زانویی ثابت و متحرک، همگی در نیمه‌ی پایینی خم صورت گرفته و به علت تقارن این مسئله، توضیحات داده شده برای نیمه‌ی بالایی لوله نیز درست است. همان‌طور که در شکل ۷ دیده می‌شود، در سطح مقطع ورودی خم در هر دو حالت ثابت و متحرک، پروفیل‌های سرعت از حالت متقارن خود در لوله صاف منحرف می‌شوند. در این موقعیت، سیال موافق با گرادبان فشار اولیه‌ی موجود در جهت طول، به سمت دیواره‌ی داخلی شتاب گرفته و کانتورهای سرعت از حالت متقارن خود در لوله صاف منحرف می‌شود، که مشاهده‌ی این تقارن نداشتن دلیل بر وجود جریان ثانویه درون خم می‌باشد [۳]. همزمان با این پدیده در قسمت دیواره‌ی خارجی، بر اثر گرادبان فشار مذکور حرکت سیال کند می‌شود. رفته رفته در سطح مقطع ۳۰ درجه بر اثر گرادبان فشار اضافی به وجود آمده از نیروی گریز از مرکز، کانتورهای سرعت بیش از پیش به سمت داخل خم کشیده می‌شوند. در سطح مقطع ۶۰ درجه، سیال با سرعت محوری



شکل ۷- کانتورها و بردارهای سرعت در زوایای گوناگون در مسئله ۱.

سیال به سمت داخل خم می شود. در سطح مقطع ۳۰ و ۶۰ درجه، میزان گرادیان فشار به شدت افزایش یافته و در سطح مقطع خروجی خم گرادیان فشار کاهش می یابد.

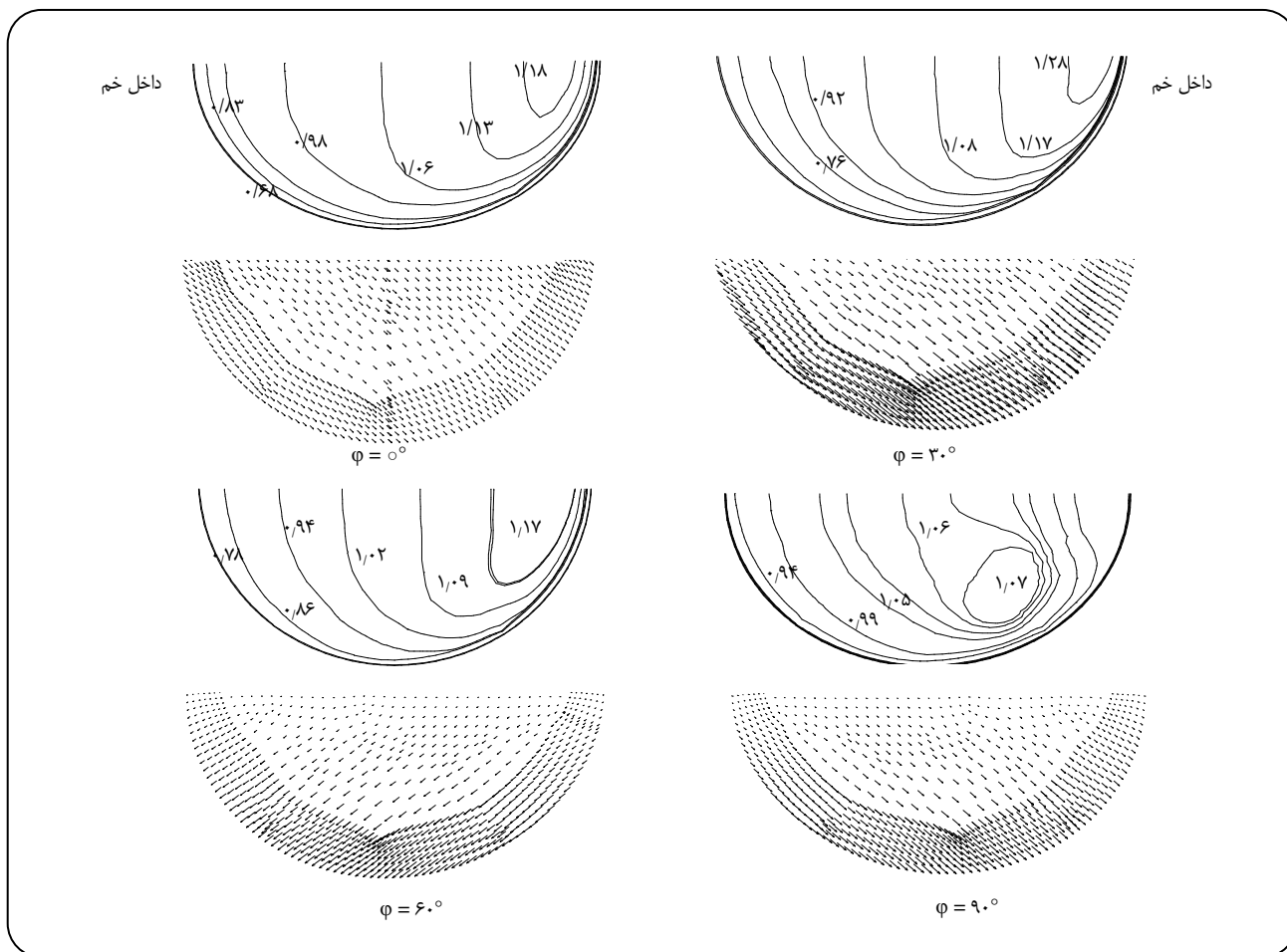
### نتیجه گیری

در این مقاله شبیه سازی میدان سرعت هوا در سه خم ساکن و متحرک با دو فرکانس ۱/۴۶ و ۲/۹۳ هرتز و سرعت محوری ورودی ۱۰/۹۷ متر بر ثانیه انجام شد. از بررسی کانتورهای سرعت در خم نوسان کننده با فرکانس ۲/۹۳ هرتز نتیجه های زیر به دست آمد:

۱- پروفیل های دایره ای شکل هم مرکز سرعت در لوله ی صاف پس از ورود به خم دچار انحرافات شده و مرکز پروفیل های سرعت محوری به سمت دیواره ی داخلی خم کشیده می شوند. این پدیده در کانتورهای ارایه شده در مرجع [۳] در شکل ۳ نیز

در خم ثابت نیز کوچکتر می شود. همچنین پروفیل های سرعت در شکل های ۷ الی ۹ تا سطح مقطع ۳۰ درجه مشابه بوده و اثر نوسان بر سیال داخل خم در شکل کانتورهای سرعت محسوس نمی باشد. اما در شکل ۹، در سطح مقطع ۶۰ درجه، زبانه های کانتورهای سرعت به دست آمده از حل مسئله ۳ نسبت به کانتورهای به دست آمده از حل مسئله های ۱ و ۲ نشان داده شده در شکل های ۷ و ۸ بیشتر به سمت داخل خم کشیده شده اند. در سطح مقطع خروجی خم نیز شکل کانتورهای سرعت شبیه به هم می باشد.

کانتورهای فشار استای به دست آمده به دست آمده از حل عددی در سطح مقطع های گوناگون در مسئله ۲ در شکل ۱۰ نمایش داده شده اند. همان طور که روشن است مقدارهای فشار در سطح مقطع ورودی خم در مجاور دیواره خارجی نسبت به این مقدارهای در دیواره داخلی خم افزایش پیدا کرده و این عامل موجب کشیده شدن



شکل ۸ - کانتورها و بردارهای سرعت در زوایای گوناگون در مسئله ۲.

پروفیل‌های سرعت به صورت زبانی شکل ظاهر می‌شود. کانتورهای زبانی شکل سرعت گزارش شده در مقاله [۳] در شکل ۳ نیز دیده می‌شود.

۴- در سطح مقطع خروجی خم به علت وارد شدن سیال به لوله صاف، شعاع انحنای خم بی‌نهایت شده و در نتیجه اختلاف نیروی گریز از مرکز که با شعاع انحنای خم رابطه مستقیم دارد، در دیواره داخلی و خارجی خم کاهش می‌یابد. در نتیجه نیروی برآیند فشاری به دست آمده در این سطح مقطع دیگر قادر به جابه‌جایی سیال به سمت دیواره داخلی خم نخواهد بود.

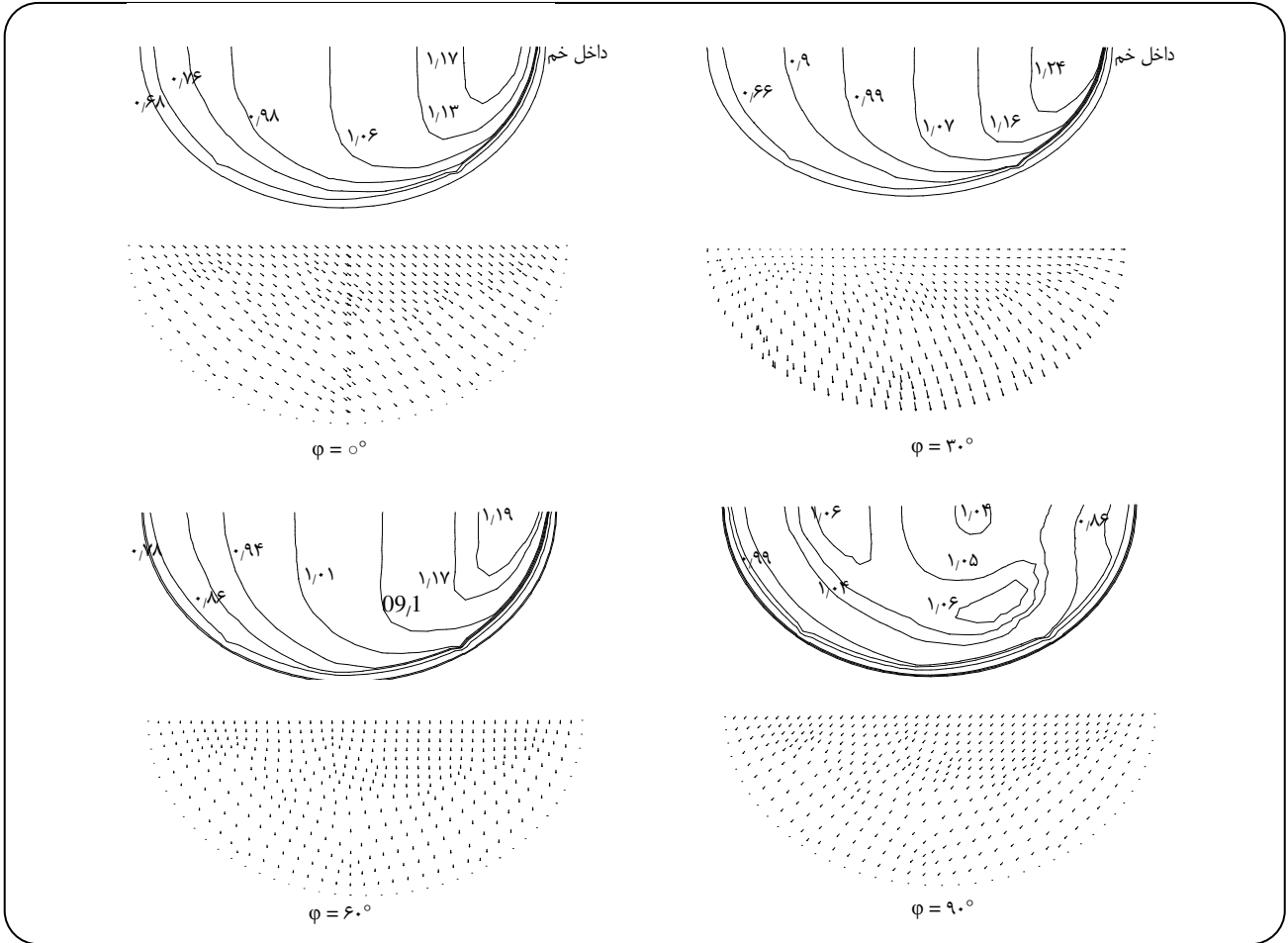
۵ - از مقایسه نمودارهای سرعت محوری در خم ساکن و متحرک در دو فرکانس، این نتیجه به دست آمد که روند تغییرهای سرعت محوری در این سه حالت همانند است. در خم ساکن و متحرک با فرکانس یک، انحراف کانتورهای سرعت به سمت دیواره داخلی خم یکسان بوده و این کانتورها در موقعیت‌های

دیده می‌شوند. این پدیده به علت متفاوت بودن نیروی گریز از مرکز در سطح مقطع عرضی خم است. از آنجایی که شعاع انحنا در دیواره خارجی خم نسبت به شعاع انحنا در دیواره داخلی خم بزرگتر است، نیروی گریز از مرکز که با شعاع انحنای خم رابطه مستقیم دارد، در دیواره خارجی خم، مقدار بیشتری را پیدا کرده و بنابراین برآیند عکس‌العمل این نیرو، که همان نیروی فشاری است به سمت داخل خم جهت می‌گیرد و پروفیل‌های سرعت به سمت دیواره داخلی خم منحرف می‌شوند.

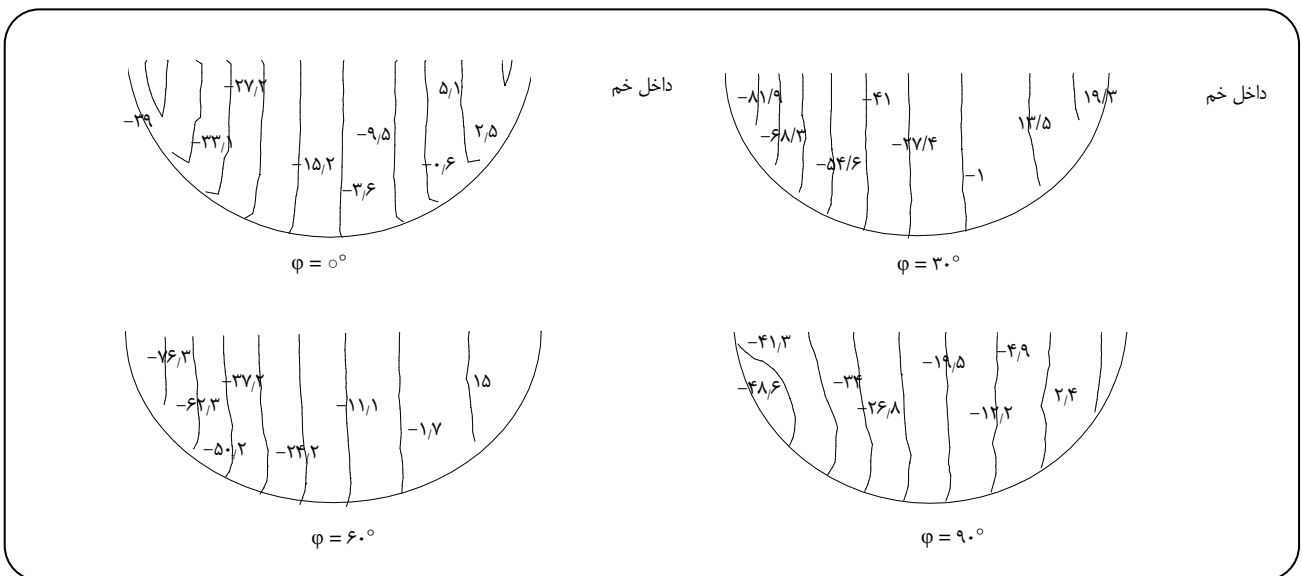
۲- در سطح مقطع ۳۰ درجه مرکز پروفیل‌های سرعت نسبت به سطح مقطع قبلی تغییر مکان نداده، که علت آن به دلیل رشد ناچیز جریان‌های ثانویه در این سطح مقطع است.

۳- رفته رفته هرچه در طول زانویی پیش می‌رویم سیال با سرعت بیشتری نزدیک دیواره‌ی داخلی خم حرکت کرده و بیشتر به سمت ناحیه‌ی داخلی خم پیشروی می‌کند و در سطح مقطع ۶۰





شکل ۹- کانتورها و بردارهای سرعت در زوایای گوناگون در مسئله ۳.



شکل ۱۰- کانتورهای بی بعد فشار استاتیک در زوایای گوناگون در مسئله ۲.

w	سرعت عمودی	متناظر دارای مقدار عددی یکسانی هستند. به بیان دیگر نوسان،
z	جهت محور	تأثیر محسوسی بر شکل و مقادیر کانتورهای سرعت ایجاد نمی‌کند.
	<b>نمادهای یونانی</b>	ولی با افزایش فرکانس نوسان، در سطح مقطع ۹۰ درجه شکل
$\varepsilon$	اتلاف اغتشاش	کانتورهای سرعت دچار تغییراتی شده، اما در سطح مقطع های
$\theta$	زاویه در سطح مقطع خم	۰، ۳۰ و ۶۰ درجه تأثیر نوسان روی شکل و مقادیرهای سرعت
$\kappa$	انرژی جنبشی اغتشاش	بسیار ناچیز است.
$\mu$	ویسکوزیته	
$\mu_T$	ویسکوزیته توربولانس	<b>نمادها</b>
$\rho$	دانسیته	g شتاب ثقل
$\tau$	نش رینولدز	p فشار
$\varphi$	زاویه در راستای خم	T زمان دوره
		t زمان
		R شعاع
		r راستای شعاع
		u سرعت عمودی
		v سرعت شعاعی

تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۱۱/۱ ؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۵/۱۱

## مراجع

- [1] Van Meerveld J., Waters S.L., Numerical Computation of the Steady Secondary Flow in a Tube with Time-Dependent Curvature, *Q. J. Mech. Appl. Math.*, **54**, p. 631 (2000).
- [۲] وکیلزاده هانفی، س؛ نصر اصفهانی، م؛ حل عددی جریان مغشوش هوا داخل زانویی ۹۰ درجه، نهمین کنگره ملی مهندسی شیمی ایران، دانشگاه علم و صنعت ایران، (۱۳۸۳).
- [3] Sudo K., Sumida M., Hibara H., Experimental Investigation on Turbulent Flow in a Circular-Sectioned 90-Degree Bend, *Experiments in Fluids*, **25**, p. 42 (1998).
- [4] Prusa J., Yao L., Numerical Solution for Fully Developed Flow in Heated Curved Tubes, *J. Fluid Mech.*, **123**, p. 503 (1982).
- [5] Enayet M.M., Gibson M.M., Taylor A.M.K.P., Yianneskis M, Laser Doppler Measurements of Laminar and Turbulent in a Pipe Bend, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, **3**, p. 213 (1982).
- [6] N. Esfahany M., Ameri E., Investigation of Airflow in a 90 Degree Bend under External Low Frequency Oscillation, *International Mechanical Engineering Conference*, p. 5 (2004).