Archive of SID.ir

نشریه مهندسی مکانیک ایران، دوره ۲۴، شماره ۴، شماره پیاپی ۶۹، زمستان ۱۴۰۱، صفحه ۱۲۸-۱۰۹
انجمن مهندسان مکانیک ایران
مقاله علمی پژوهشی

DOI: 10.30506/IJMEP.2022.526994.1775
DOR: 20.1001.1.25384775.1401.24.4.5.7

توسعه مدل دبی سنج الکترومغناطیسی با بهره گیری از الگوی ترکیبی مبتنی بر نتایج شبیه سازی عددی و روش تخمین داده ها

محسن یوسفی[۱]
کارشناسی ارشد

محمدکاظم مویدی[۲]
استادیار

دبی سنج های الکترومغناطیسی دستگاه هایی با دقت بالا هستند که می توانند برای اندازه گیری جریان سیال در سیستم های مهندسی از جمله شبکه های آب رسانی شهری بکار روند. در این پژوهش از مدل سازی دبی سنج الکترومغناطیسی با بهره گیری از الگوی ترکیبی مبتنی بر داده های شبیه سازی عددی و روش های برازش داده برای لوله ای به قطر ۱۰۰ میلی متر و طول ۸۰۰ میلی متر در حالت جریان آشفته استفاده شده است. مدل عددی از شبیه سازی سه بعدی با ایجاد میدان مغناطیسی در مرکز هندسه و اندازه گیری دبی سیال با استفاده از قانون فارادی و معادلات ماکسول بهره گرفته است. در واقع فیزیک مسئله به این گونه است که برای اندازه گیری دبی سیال یک میدان مغناطیسی در مرکز هندسه که محل قرارگیری القاء کننده های الکترومغناطیسی است ایجاد شد. با عبور سیال که حاوی هدایت الکتریکی است، شدت القای الکترومغناطیسی در آن مقطع به دست آمد و با استفاده از این داده ها مقدار سرعت و دبی جریان محاسبه شد. بدین منظور شبیه سازی جریان تحت اثر شدت الکترومغناطیسی به ازای مقادیر ۰/۰۱ ، ۰/۰۳ و ۰/۰۵ (تسلا) انجام شده تا مناسب ترین شدت به دست آید. نتایج حاصل شده نشان می دهند تا شدت ۰/۰۳، میدان مغناطیسی در ساختار جریان تاثیر چندانی ندارد. به منظور توسعه مدل جایگزین دبی سنج الکترومغناطیسی از روش تخمین سرعت متوسط ورودی مبتنی بر اطلاعات داده های شبیه سازی عددی بهره گرفته شده است. ابتدا برای تعدادی فشار مشخص (اختلاف فشار) شدت میدان در موقعیت حسگرها به دست آمد، سپس با استفاده از این مقادیر سرعت متوسط ورودی با استفاده از نرم افزار به‌دست آمده است. به روش داده کاوی شدت مغناطیسی جدید و متفاوت از مقادیر بکار رفته حاصل شد. به منظور اطمینان از صحت نتایج، داده های حاصل با مقادیر محاسبه شده از نرم افزار، مقایسه شده اند.

واژه های راهنما: دبی‌سنج الکترومغناطیسی، دینامیک محاسباتی، شدت القای مغناطیسی، جریان آشفته

[۱] کارشناسی ارشد، آزمایشگاه پژوهشی توربولانس، دینامیک سیالات محاسباتی و احتراق، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه قم، قم، ایران
mohsenyousefi20@yahoo.com
[۲] نویسنده مسئول، استادیار، آزمایشگاه پژوهشی توربولانس، دینامیک سیالات محاسباتی و احتراق، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه قم، قم، ایران moayyedi@qom.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۸، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۱۱

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

۱- مقدمه

در صنعت آب، اندازه‌گیری جریان سیال بسیار مهم بوده و به همین جهت از روش‌های مختلفی جهت اندازه‌گیری استفاده می‌شود، ازجمله می‌توان به روش توربینی، روش اولتراسونیک، روش اریفیس پلیت، روش روتامتر، روش کوریولیس و روش الکترومغناطیسی اشاره کرد. اما یکی از بهترین روش‌ها، استفاده از دبی سنج‌های الکترومغناطیسی است. جریان‌سنج‌های الکترومغناطیسی به کمک اندازه‌گیری ولتاژ القاشده در اثر عبور سیال از مقطع لوله می‌توانند مقدار جریان آب را با دقت قابل‌قبولی اندازه‌گیری کنند. القای الکترومغناطیسی به‌طور مستقل توسط مایکل فارادی در سال ۱۸۳۱ و جوزف هنری در سال ۱۸۳۲ میلادی کشف شد. فارادی اولین کسی بود که نتایج آزمایش‌های خود را منتشر کرد. اولین نمایش آزمایشی القای الکترومغناطیسی توسط فارادی در ۲۹ آگوست ۱۸۳۱ به نمایش گذاشته شد، وی دو سیم را در دو طرف مخالف حلقه آهن پیچید (آرایش شبیه ترانسفورماتور توروئید مدرن)، وی بر همین اساس ارزیابی خود از خصوصیات مغناطیس الکترومغناطیسی را کشف شده دید. مایکل فارادی القای الکترومغناطیسی را با استفاده از مفهومی که خطوط نیرو نامید توضیح داد، این القا به دلیل تغییر مغناطیسی بود که هنگام اتصال و قطع باتری انجام می‌شد اتفاق می‌افتاد. بااین‌حال دانشمندان در آن زمان ایده‌های نظری وی را به‌طور گسترده رد کردند، عمدتاً به این دلیل که این نظریه‌ها ازنظر ریاضی فرمول‌بندی نشده بودند. با این تفاسیر محققی استثنا وجود داشت به نام جیمز کلارک ماکسول، که در سال‌های ۱۸۶۱ تا ۱۸۶۲ از عقاید فارادی به‌عنوان مبنای نظریه الکترومغناطیسی خود استفاده کرد. در مقالات ماکسول جنبه متغیر زمان القای الکترومغناطیسی به‌عنوان یک معادله دیفرانسیل بیان‌شده است که الیور هیویسید از آن به‌عنوان قانون فارادی یاد می‌کند. در سال ۱۹۶۲ فرضیات شرکلیف تحت تابعی از شعاع و شدت مغناطیسی بود اما در سال ۱۹۷۲ حل معادله جریان‌سنج الکترومغناطیسی، با القای مغناطیسی غیریکنواخت و پروفیل‌های سرعت و رسانایی متقارن محور، در قالب یک سری قدرت همگرا توسط فیزیکدان باکر آورده شده که در آن تغییرات پتانسیل الکتریکی نیز لحاظ شده است[۱]. محاسبه مشخصات جریان‌سنج الکترومغناطیسی از داده‌های میدان مغناطیسی به‌صورت آزمایشگاهی توسط بویر و همکارانش صورت گرفته شد و نتایج نشان می‌دهد عملکرد هر جریان‌سنج الکترومغناطیسی کاملاً با هندسه، نوع و شکل الکترودها و شکل میدان مغناطیسی آن تعیین می‌شود. توصیفی از روشی ارائه‌شده که ممکن است برای پیش‌بینی عملکرد یک جریان‌سنج الکترومغناطیسی تحت محدودیت‌های خاص استفاده شود. نتایج حاصل از مقایسه بین حساسیت‌های به‌دست‌آمده با استفاده از روش آزمایشگاهی و با مشاهده مستقیم نشان می‌دهد که این روش عملی است. این می‌تواند هم به‌عنوان وسیله‌ای برای درجه‌بندی دقیق یک جریان‌سنج الکترومغناطیس مشخص و هم به‌عنوان کمکی برای طراحی جریان‌سنج الکترومغناطیسی استفاده شود[۲]. جریان‌سنج الکترومغناطیسی معمولاً شناخته‌شده‌اند که نسبت به اثرات مشخصات سرعت کاملاً حساس نیستند، لونتا و هالتونن تأثیر پروفیل سرعت در الکترومغناطیس و اندازه‌گیری جریان را موردبررسی قراردادند بااین‌حال، نتایج آزمایش نشان می‌دهد که حتی بهترین کنتورها نیز به اختلال‌ها جریان حساس هستند. درهرصورت مدل‌سازی دقیق ریاضی برای جریان و کنتورها موردنیاز است. میدان مغناطیسی جریان‌سنج الکترومغناطیسی اندازه‌گیری شده و مدل کنتور به روش ریاضی محاسبه‌شده است. مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه‌شده از مشخصات سرعت جریان آب برای تخمین خطا استفاده‌شده است.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

بنابراین روش‌های عددی به‌عنوان راه‌حلی برای این مسئله پیشنهاد می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که اگر فاصله بین اتصالات و کنتور بیش از ۵ برابر قطر لوله باشد می‌توان انتظار داشت که خطا کمتر از ۰/۵٪ باشد. خطاهای اندازه‌گیری شده برای چهار جریان‌سنج الکترومغناطیسی مختلف نشان داد که اثر یک اختلال در فاصله‌های مختلف متفاوت است[۳]. لیم و شانگ اثرات نصب یک اتصال زانویی شکل در مسیر جریان‌سنج الکترومغناطیسی[1] پایین‌دست را موردبررسی قراردادند. اتصال زانویی شکل دارای زاویه ۹۰ درجه هست. برای اندازه‌گیری، دبی جریان آرام فرض شده و حل به‌صورت عددی شبیه‌سازی‌شده است. در ادامه اثرات نصب را با تغییر مکان جریان‌سنج الکترومغناطیسی در فاصله ۲ تا ۲۲برابر قطر لوله از اتصال زانویی بررسی شد. همچنین زاویه قرارگیری الکترودها در میدان مغناطیسی در زوایای صفر و ۴۵ و ۹۰ درجه از محور تقارن شبیه‌سازی شد. در این مطالعه مشخص شد که انحراف سیگنال جریان به دلیل اختلال از اتصال زانویی به‌شدت به الگوی خطوط سرعت محوری بستگی دارد. مواردی که برای زاویه ۴۵ درجه الکترود در نظر گرفته شد در مقایسه با صفر و۹۰ درجه دقت اندازه‌گیری بهتری داشته و تأثیر انحنا بر فاصله نصب مطلوب به تعداد رینولدز بستگی دارد[۴]. بوریس هورنر از یک جریان‌سنج الکترومغناطیسی شش الکترود حساس به مشخصات مناسب برای مصارف صنعتی استفاده کرد. یک جریان‌سنج الکترومغناطیسی مناسب برای نصب بلافاصله پایین‌دست خم‌ها، سوپاپ‌ها، اتصال‌ها سه‌راهی و غیره قرار داده شد. استفاده از شش به‌جای دو الکترود تغییرات جزئی در قطب سیستم مغناطیسی را منجر شد به‌طوری‌که باعث بهبود دقت اندازه‌گیری و کاهش قابل‌توجه حساسیت جریان‌سنج الکترومغناطیسی به تغییرات جریان بود. بااین‌حال ازنظر هزینه تولید شش الکترود با یک جریان‌سنج دو الکترودی قابل‌مقایسه است و ازاین‌رو برای سیستم‌های با قطر بزرگ مقرون‌به‌صرفه هست[۵]. میشالسکی از جریان‌سنج الکترومغناطیسی برای کانال‌های باز استفاده کرد و دو مشکل وجود داشت یکی سطح متغیر آب و دیگری نفوذ آب از اطراف کانال به بیرون از جریان، در این بررسی نشان داده‌شده که بااینکه خطای کالیبراسیون وجود دارد اما برای دبی‌های بالا از نظر اقتصادی باصرفه بوده قابل‌استفاده است[۶]. ژایو و همکاران درزمینه بهینه‌سازی میانگین سرعت جریان از چندین الکترود القایی استفاده کردند. استفاده از روش اندازه‌گیری چند الکترود به‌صورت هم‌زمان نه‌تنها می‌توان تعداد داده‌های اندازه‌گیری را به نصف آنچه در معادلات آمده، کاهش داد بلکه نسبت سیگنال به نویز اندازه‌گیری را نیز کاهش داد. الگوریتم داده‌ها همچنین می‌تواند با استفاده از چندین حسگر در موارد دیگر برای تخمین سرعت قابل اعتمادتر از دیگر روش‌های اندازه‌گیری باشد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان داد که این الگوریتم قوی و مؤثر است[۷]. درزمینه چند الکترود لوژان سو و همکارانش نیز تحقیقاتی انجام دادند. تعداد الکترودها و اندازه الکترودها دو پارامتر اصلی بررسی‌شده در این پژوهش بود. از روش اندازه‌گیری هم‌زمان برای تجزیه‌وتحلیل تأثیر هر دو پارامتر در تخمین میانگین سرعت جریان استفاده شد. هر دو پارامتر برای طراحی آرایه الکترود برای یک القا کاربرد دارند. برای طراحی آرایه الکترود برای یک القا باید دقت ماشین‌کاری مکانیکی، قابلیت اطمینان عملکرد حسگرها و مواد الکترودها باید در نظر گرفته شود[۸]. تز و همکارانش به مطالعه درزمینه نیروی لورنتس و سرعت سنجی سیال توسط آن پرداختند. آن‌ها یک روش غیر تماس برای اندازه‌گیری سرعت در مایع‌های رسانای الکتریکی را توصیف کردند که مبتنی بر قراردادن مایع در معرض میدان مغناطیسی و اندازه‌گیری نیروی کشش وارد بر

[1] Electrod magneted flowmeter(EMF)

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

خطوط میدان مغناطیسی بود[۹]. کرمی‌فرد و همکارانش درزمینه طراحی و شبیه‌سازی جریان‌سنج الکترومغناطیسی برای لوله‌ای با سطح مقطع دایروی مطالعه داشتند. در این تحقیق، میدان مغناطیسی با شدت ثابت (سیم پیچ اطراف لوله) خارج از لوله تولید شده که باعث به وجود آمدن ولتاژ القایی، به علت جریان مایع هدایت شده توسط الکترودها در دو طرف انتهایی دیوار لوله شده، می‌شود. در این تحقیق از مدل دوبعدی استفاده‌شده که می‌توان آن را با روش اختلاف محدود برای محاسبه پتانسیل القایی بین الکترودها حل کرد[۱۰]. بولان و همکارانش درزمینه شبیه‌سازی سه‌بعدی مگنتوهیدرودینامیک جریان‌سنج الکترومغناطیسی برای جریان‌های آرام و آشفته انجام گردید. تعامل بین یک سیال هدایت الکتریکی و یک میدان مغناطیسی خارجی در یک جریان‌سنج الکترومغناطیسی استوانه‌ای ایده‌آل برای آرام و آشفته موردبررسی قرار گرفت. پتانسیل الکتریکی ایجادشده در سیال و تفاوت در پتانسیل الکترودهای اندازه‌گیری به‌طور مستقیم با استفاده از اثرات مگنتوهیدرودینامیک در شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی موردبررسی قرارگرفته شد. اختلاف پتانسیل الکتریکی محاسبه‌شده در الکترودها با مقادیر تحلیلی برای موارد کوچک هارتمن مطابقت دارد، درحالی‌که اثر نیروی لورنتس القاشده کوچک است[۱۱]. ژانگ کاو و همکارانش درزمینه بهینه‌سازی کویل جریان‌سنج الکترومغناطیسی برای بررسی تغییرات سرعت در مقاطع مختلف میدان جریان تحقیق کردند. سیم‌پیچ‌ها در زوایای گوناگون و فواصل مختلف قرارگرفته شد تا تأثیر آن بر توزیع سرعت مشاهده شود. برای مقایسه تأثیر پروفیل‌های مختلف جریان در قسمت سیم‌پیچ‌ها چندین توزیع جریان متفاوت موردبررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد سیم‌پیچ مطلوب (زینی شکل) نسبت به دیگر سیم‌پیچ‌ها حساسیت کمتری به پروفیل جریان‌های پیچیده‌تر دارد[۱۲]. جریان‌سنج الکترومغناطیسی در مکان‌های مختلف جهت ارزیابی پروفیل‌های سرعت و تجزیه‌وتحلیل خطا توجه مارتین و همکارانش را جلب کرد. قابلیت اطمینان و دقت یک جریان‌سنج به‌عنوان کارکرد نادرست به شرایط نصب آن بستگی دارد و ممکن است نتایج نهایی را تحریف کند. هدف از این کار تعیین خطاهای به‌دست‌آمده در یک الکترومغناطیسی بود. نتایج نشان می‌دهد که شرایط نصب جریان‌سنج الکترومغناطیسی با توجه به موقعیت آن نسبت به خط لوله اتصالات، در پروفایل سرعت و کیفیت اندازه‌گیری تأثیر زیادی دارد[۱۳]. پاولو کارمن به همراه همکارانش درزمینه مناسب‌ترین مکان برای نصب جریان‌سنج الکترومغناطیسی و آلتراسونیک در شبکه آب‌رسانی پژوهشی انجام دادند. در شبکه آب‌رسانی فاصله نصب ناکافی شیرهای کنترل جریان، اختلالات بالادستی ایجاد می‌کند که باعث افزایش خطاهای اندازه‌گیری و کاهش دقت تجهیزات می‌شود. بنابراین، برآورد این خطاها برای ایجاد فاصله صحیح نصب لوازم اندازه‌گیری و اطمینان از قابلیت صحیح کارکرد جریان‌سنج‌ها مهم است. شبیه‌سازی‌های عددی برای شیرهای کشویی (۲۵، ۵۰ و ۷۵ درصد بسته) و شیرهای پروانه‌ای (کاملاً باز و ۳۰ درجه بسته) صورت گرفته شد. آن‌ها نتایج خود را در فواصل مختلف جریان‌سنج‌ها از شیرآلات موردبررسی قراردادند[۱۴]. مطالعه بر روی یک جریان‌سنج الکترومغناطیسی جدید بر اساس تحریک موج ذوزنقه‌ای سه مقداری توسط لیانگ جی و همکارانش بررسی شد. نتایج آزمایش نشان می‌دهد که نیروی الکتروموتور خروجی توسط جریان‌سنج الکترومغناطیسی بر اساس تحریک موج ذوزنقه‌ای سه مقداری به‌طور خطی با سرعت جریان مرتبط است. هنگامی‌که سرعت افزایش می‌یابد خطای نسبی کاهش می‌شود. این تحقیق همچنین نشان می‌دهد که فرکانس تحریک تأثیر زیادی بر دقت اندازه‌گیری جریان‌سنج الکترومغناطیسی بر اساس تحریک موج ذوزنقه‌ای سه مقدار دارد[۱۵].

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

تحقیقات درزمینه شبیه‌سازی دستگاه‌های اندازه‌گیری جریان به روش الکترومغناطیسی سیال بسیار اندک صورت گرفته و تا حدودی به کلیات یعنی شبیه‌سازی میدان مغناطیسی و بهینه‌سازی ساختار میدان مغناطیسی پرداخته‌شده است. در این پژوهش، به‌منظور توسعه مدل جایگزین دبی‌سنج الکترومغناطیسی از یک روش تخمین دبی جریان ورودی مبتنی بر اطلاعات داده‌های شبیه‌سازی عددی بهره گرفته‌شده است. به همین منظور بررسی میزان شدت مغناطیسی واردشده بر روی اندازه‌گیری جریان حائز اهمیت است. مدل‌سازی دبی‌سنج الکترومغناطیسی با بهره‌گیری از الگوی ترکیبی مبتنی بر داده‌های شبیه‌سازی عددی حاصل از نرم‌افزار انسیس فلوئنت نسخه ۲۰۱۶ و روش‌های برازش داده به ازای تغییر پارامترهای مهم جریان در این مسئله انجام گرفته‌است. با استفاده از مدل حاصل می‌توان تغییرات ساختار جریان دراثر تغییرات فشار یا متعلقات شبکه را بررسی و تأثیر آنها بر دقت اندازه‌گیری سرعت متوسط را مطالعه کرد. همچنین درصد خطای اندازه‌گیری سرعت متوسط ورودی با افزایش شدت مغناطیسی را محاسبه کرد. از دیگر ویژگی‌های پژوهش حاضر استفاده از روش‌های داده‌کاوی به منظور توسعه مدل ترکیبی مبتنی بر داده‌های شبیه‌سازی عددی می‌باشد.

۲- معادلات حاکم

در این پژوهش مدل‌سازی دبی‌سنج الکترومغناطیسی با الگوی دینامیک سیالات محاسباتی بر پایه هیدرودینامیک مغناطیسی به‌منظور اندازه‌گیری میزان دبی عبوری انجام‌شده است. اساس کار جریان‌سنج‌های الکترومغناطیسی بر اساس قانون فارادی می‌باشد، به این صورت که با ایجاد شار مغناطیسی در محیط داخلی یک مجرا، به‌طوری‌که تمام داخل لوله را در برگیرد و در اثر عبور سیال که دارای هدایت الکتریکی است، ولتاژی القاشده که می‌توان آن را از رابطه (۱) به دست آورد[۱۶].

$$U = K \times B \times D \times V \qquad (۱)$$

که در آن، U ولتاژ القاشده در سیال می‌باشد، K ضریب ثابت، B شدت میدان مغناطیسی، D فاصله الکترودهای دریافت‌کننده ولتاژ القایی و V سرعت سیال می‌باشد. درواقع در جریان‌سنج‌های الکترومغناطیسی محاسبه دقیق سرعت سیال مهم بوده که با داشتن آن، دبی جریان از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$Q = A \times V \qquad (۲)$$

به‌طوری‌که A سطح مقطع داخل لوله و Q دبی سیال می‌باشد. نکته حائز اهمیت این است که جهت اندازه‌گیری با این روش می‌بایست ضریب هدایت الکتریکی مایع بیش از ۵ میکرو زیمنس در سانتی‌متر باشد.

۲-۱- معادلات حاکم بر جریان

معادلات ناویراستوکس یک مدل ریاضی مناسب برای تحلیل دینامیک جریان سیال می‌باشد. این معادلات برای یک جریان تراکم ناپذیر و آشفته شامل معادله پیوستگی و اندازه حرکت خطی به شرح زیر می‌باشد:

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

$$\nabla.V = 0$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \ V.\nabla \ V = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \ \nu + \nu_t \ \nabla^2 V \tag{۳}$$

۲-۲-۱- معادلات جریان تحت تأثیر میدان الکترومغناطیسی

مگنتوهیدرودینامیک مطالعه خواص مغناطیسی و رفتار سیالات هادی میدان الکتریکی است. این‌یک اتصال بین معادلات ناویر-استوکس برای دینامیک جریان و معادلات ماکسول برای الکترومغناطیس ایجاد می‌کند. میدان مغناطیسی می‌تواند جریان را در یک سیال دارای هادی الکتریکی ایجاد کرده که به‌نوبه خود باعث ایجاد نیرو در سیال شده و تأثیراتی را در میدان جریان به وجود آورد که اگر شدت آن زیاد باشد باعث تغییر رفتار شدید جریان نیز می‌شود که در ادامه به بررسی آن پرداخته‌شده است. معادلات حاکم بر یک میدان جریان تحت اثرات الکترومغناطیسی مشابه با معادلات بقای اندازه حرکت و جرم بوده اما در معادلهٔ اندازه حرکت اثر میدان مغناطیسی به‌صورت یک عبارت نیروی اضافی (نیروی لورنتس) ظاهر می‌شود. بر این اساس معادلهٔ اندازه حرکت اصلاح‌شده به‌صورت زیر خواهد بود[۱۶].

$$\rho\frac{\partial V}{\partial t} + \rho \ V.\nabla \ V = J \times B - \nabla p + \ \mu + \mu_t \ \nabla^2 V \tag{۴}$$

در معادلهٔ فوق، بردار J چگالی جریان الکتریکی بوده که می‌تواند از طریق القای مغناطیسی B بیان شود. نیروی لورنتس $J \times B$ را می‌توان با استفاده از قانون آمپر محاسبه کرد[۱۶].

$$J = \frac{1}{\mu_0}\nabla \times B$$

$$J \times B = \frac{B.\nabla \ B}{\mu_0} - \nabla\left(\frac{B^2}{2\mu_0}\right) \tag{۵}$$

Eشدت میدان الکتریکی بوده و با استفاده از معادلات ماکسول به دست می‌آید[۱۶].

$$E = V \times B \tag{۶}$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -\nabla \times E \tag{۷}$$

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

دیورژانس شدت میدان مغناطیسی از معادله زیر به دست می‌آید[۱۶]

$$\nabla.B = 0 \qquad (۸)$$

۲-۲-۲- مدل‌سازی آشفتگی

در این پژوهش از مدل آشفتگی کی_اپسیلون استاندارد که یکی از متداول‌ترین و کاربردی‌ترین مدل‌های دومعادله‌ای می‌باشد، استفاده‌شده است. این مدل از دو معادله انتقالی برای محاسبه تغییرات انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی بهره می‌برد. درواقع این مدل در اغلب مسائل دینامیک سیالات از کیفیت و دقت مناسبی برخوردار است. مدل آشفتگی کی-اپسیلون در عین ساده بودن تطبیق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد که منجر به استفاده از آن در این شبیه‌سازی‌شده است. معادلات مدل آشفتگی کی-اپسیلون استاندارد شامل معادلهٔ انتقال برای انرژی جنبشی آشفتگی kمطابق رابطه (۹) بیان می‌شود:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla.(ku_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\frac{\nu_t}{\partial_k} + \nu\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + G_k + G_b + \varepsilon \qquad (۹)$$

و معادلهٔ نرخ اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی ε به شرح زیر می‌باشد:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla.(\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} + \nu\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}(G_k + C_{3\varepsilon}G_b) - C_{2\varepsilon}\frac{\varepsilon^2}{k} \qquad (۱۰)$$

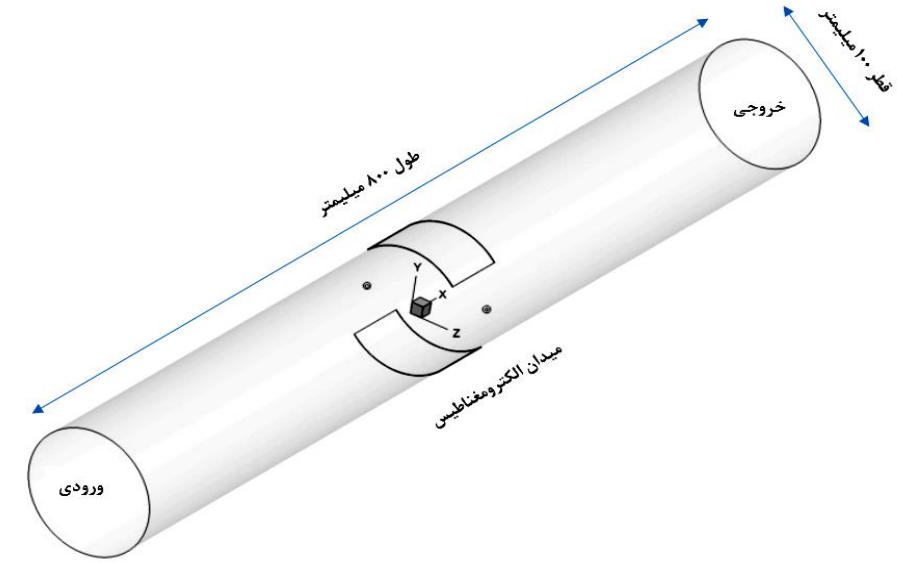
که در آن C_1 و C_2ضرایب ثابت، ν لزجت سینماتیک و k ثابت ون کارمن است. G_k ترم تولید انرژی ناشی از گرادیان‌های سرعت متوسط جریان، G_b ترم تولید انرژی ناشی از بویانسی و u_i سرعت متوسط ورودی.

۳- هندسه مدل، شبکه محاسباتی و شرایط مرزی

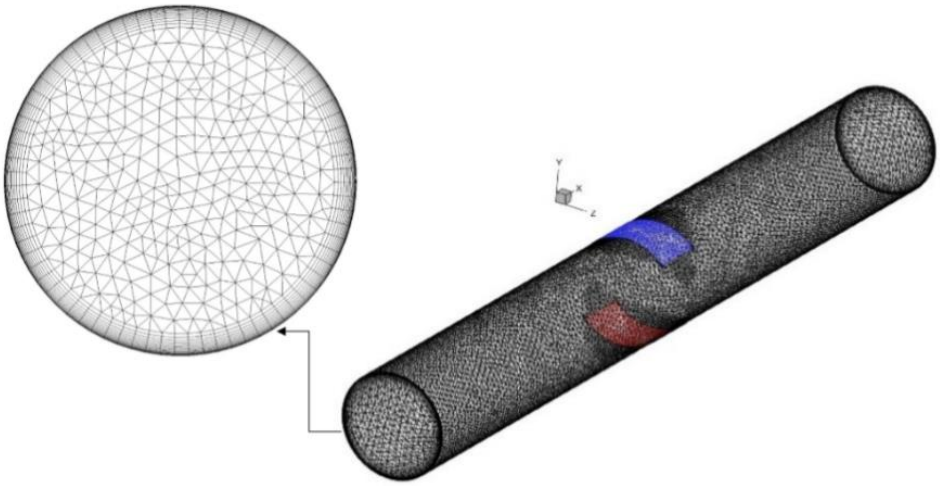
همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود هندسه مسئله شامل یک لوله به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و طول ۸۰۰ میلی‌متر به‌صورت سه‌بعدی طراحی شد، همچنین در این هندسه از دو مگنت جهت شبیه‌سازی میدان الکترومغناطیسی بهره گرفته شد. سیال عامل آب با هدایت الکتریکی بالای ۵ میکرو زیمنس در تمام مقطع می‌باشد. دو الکترود در فاصله ۵۰ میلی‌متری از خط تقارن مرکزی مجرا و در راستای محور Z (به‌صورت متقارن) پیش‌بینی‌شده است. به‌منظور ایجاد دامنه حل، مگنت‌ها در مرکز هندسه و ورودی سیال به لوله از فضای باز با فشار اتمسفر در نظر گرفته‌شده است. همچنین جریان سیال تراکم ناپذیر در اثر اختلاف فشار در ورود و خروج هندسه مدنظر می‌باشد. این مدل شامل سه بخش ورودی، بخش مرکزی (اندازه‌گیری دبی) و بخش خروجی می‌باشد. در بخش ورودی فرض بر این است که سیال تمام سطح مقطع لوله را در برمی‌گیرد.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



شکل ۱- هندسه مسئله مورد بررسی



شکل ۲- ساختار شبکه محاسباتی برای مدل هندسی مسئله مورد نظر

شکل (۲) شبکه محاسباتی در حجم کنترل موردنظر و کیفیت شبکه در مقطعی داخل لوله را نمایش می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، شبکه در نزدیکی دیواره که تغییرات سرعت زیاد است، به‌صورت فشرده‌تر و منظم در نظر گرفته‌شده و مشخصاً بافاصله گرفتن از دیواره شبکه درشت می‌شود. درواقع در نقاطی که تغییرات در میدان جریان کم است مانند محور مرکزی لوله، اندازه شبکه بزرگ در نظر گرفته‌شده است؛ بنابراین همان‌طور که توضیح داده شد، در نواحی که تغییرات جریان شدید است، شبکه به‌صورت فشرده‌تر تنظیم‌شده است. همچنین این نکته نیز حائز اهمیت است که چنین مدل شبکه‌ای می‌تواند به سبب توزیع مناسب المان‌های شبکه حسب ویژگی میدان جریان در ناحیه مورد نظر علاوه بر حفظ دقت، زمان محاسباتی را نیز کاهش دهد.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

۴- روش حل عددی

به‌منظورحل معادلات حاکم بر میدان جریان، معادلات آشفتگی و معادلات الکترومغناطیسی از روش عددی استفاده‌شده است. در این پژوهش از روش سیمپل مبتنی بر الگوی حجم محدود برای حل معادلات بقای جرم و اندازه حرکت در شکل انتگرالی استفاده‌شده است. معادلات میدان جریان با روش مرتبهٔ دوم بالادست جداسازی شده و برای حل عددی معادلات انرژی جنبشی و نرخ اضمحلال آشفتگی نیز از روش مرتبهٔ اول بالادست استفاده شده‌است. روش گسسته سازی برای محاسبهٔ ترم‌های گرادیان، روش سلول محور گرین-گوس[1] بوده و برای ترم فشار در معادله مومنتوم از روش گسسته‌سازی مرتبه دوم بهره گرفته شده‌است. همچنین برای حل معادلات میدان الکترومغناطیس از روش مرتبه دوم بالادست استفاده‌شده است.

۵- استقلال حل از شبکه

از مهم‌ترین عواملی که بر نتایج حاصل از محاسبات عددی تأثیر می‌گذارد تعداد المان‌های شبکه محاسباتی است. جهت دستیابی به شبکه‌ای که ازلحاظ دقت و هزینه محاسباتی بهترین حالت را داشته باشد، نتایج در تعداد المان‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در این پژوهش به‌منظور بررسی استقلال از شبکه در حل عددی، هندسه حل با پنج شبکه‌بندی با اندازه‌های متفاوت در همه زوایا موردبررسی قرارگرفت. در جدول (۱) تعداد المان‌های مذکور به همراه مدل شبکه‌بندی مشخص‌شده است. هندسه با قطر ۱۰۰ میلی‌متر، طول ۸۰۰ میلی‌متر و اختلاف فشار ۱۰۰۰ پاسکال مورد مطالعه قرارگرفته است. در شکل (۳) و (۴) تغییرات مؤلفه افقی سرعت و پروفیل سرعت نمایش داده‌شده است. زمانی که اختلاف نتایج به‌دست‌آمده به ازای تعداد المان‌های مختلف شبکه ناچیز شد، افزودن تعداد المان‌های شبکه‌بندی الزامی ندارد. لذا با توجه به نتایج حاصل و به‌منظور کاهش هزینه و زمان محاسبات، شبکه‌بندی مدل D مناسب‌ترین شبکه‌بندی به‌عنوان مدل منتخب برای حل عددی، مورد استفاده قرارگرفته است.

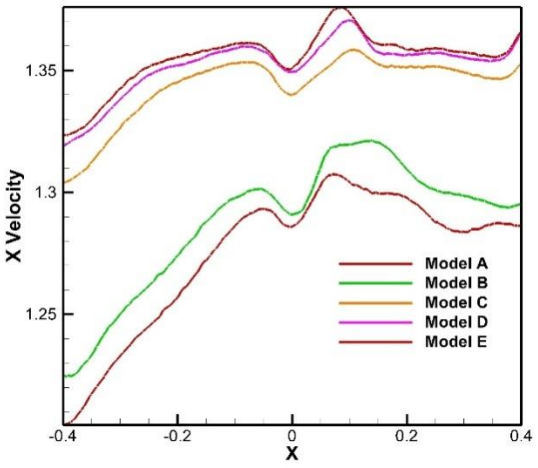
جدول ۱- تعداد شبکه‌بندی در طول ۸۰۰ میلی مترو قطر ۱۰۰ میلی‌متر

شبکه‌بندی	تعداد المان
Model A	244,000
Model B	318,000
Model C	765,000
Model D	878,000
Model E	969,000

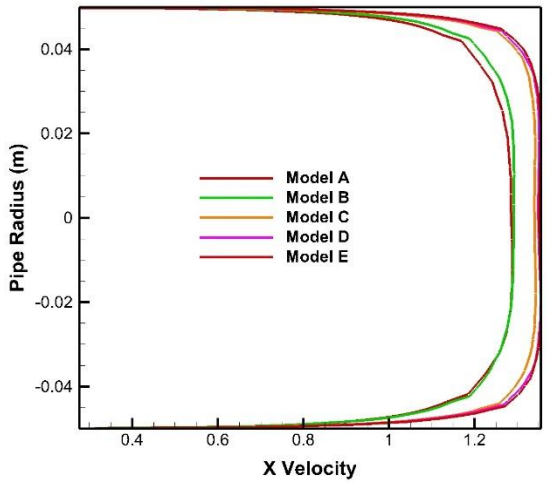
[1]Green-Gauss Cell-Based

Archive of SID.ir

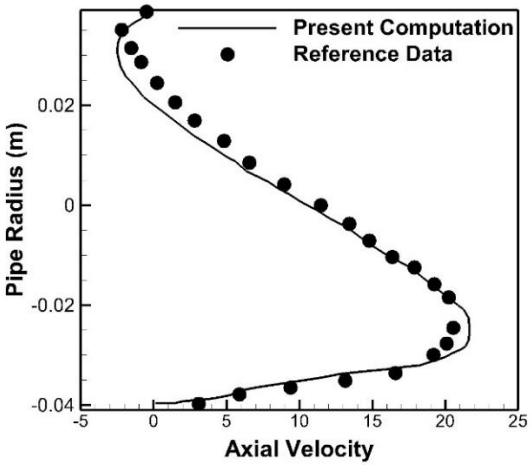
Archive of SID.ir



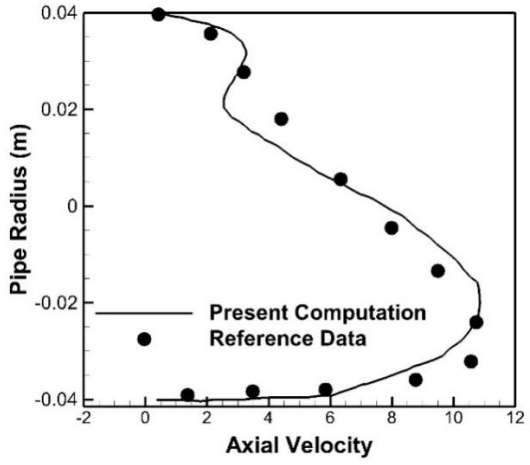
شکل ۳– تغییرات مولفهٔ افقی سرعت در راستای لوله تحت تأثیر تغییرات تعداد المان‌های شبکه محاسباتی



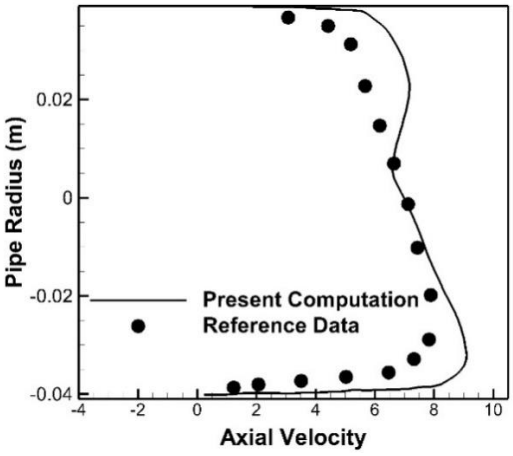
شکل ۴– پروفیل سرعت درازای تغییرات تعداد المان شبکه محاسباتی



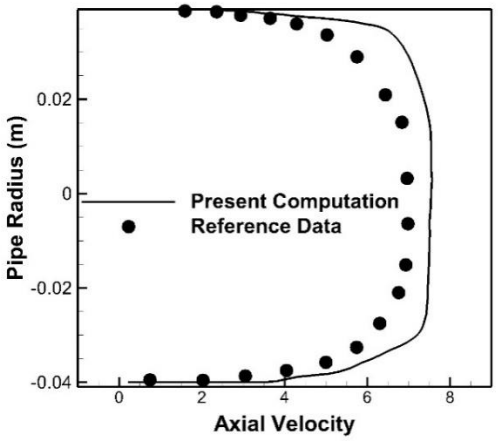
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۵– مقایسه پروفیل سرعت در راستای جریان حاصل از پژوهش حاضر با نتایج مرجع در فاصله (الف) بسیار اندک در حدود ۵ میلی‌متر از تیغه شیر، (ب) سه برابر قطر لوله، (ج) شش برابر قطر لوله، (د) جریان توسعه‌یافته، از شیر کشویی ۷۵ درصد بسته[۱۴].

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

۶- صحت سنجی نتایج حل عددی

به‌منظور صحه گذاری روش حل عددی، نتایج حاصل با شبیه سازی های عددی جریان درون یک مجرا که توسط پالو کارمن و همکارانش انجام گردید، مقایسه شده است [۱۴]. هدف از این کار کسب اطمینان از مدل استفاده‌شده در پژوهش حاضر می‌باشد. مدل موردبررسی یک مجرا به قطر ۸۰ میلی‌متر و طول ۱۵۰۰ میلی‌متر می‌باشد که در فاصله ۳۰۰ میلی‌متر از ورودی مدل یک شیر کشویی با ۷۵ درصد بسته از قسمت فوقانی تعبیه‌شده است. شکل ۵ مقایسه پروفیل سرعت در راستای جریان حاصل از پژوهش حاضر با نتایج مرجع در چهار موقعیت را نشان می‌دهد. در حالت (الف) پروفیل سرعت در جریان پایین‌دست و در موقعیتی که با تیغه شیر فاصله بسیار اندک در حدود ۵ میلی‌متر داشته است، نمایش داده‌شده است. در قسمت فوقانی پشت شیر برگشت جریان و در قسمت پایین تیغه شیر افزایش سرعت نسبت به جریان بالادست به وجود آمده است. درشکل (ب) تغییرات به شکل (الف) نزدیک بوده با این تفاوت که دیگر جریان برگشتی وجود ندارد. درشکل (ج) پروفیل سرعت با فاصله گرفتن از شیر، جریان تمایل به حالت کاملاً توسعه‌یافته داشته است. در شکل (د) جریان توسعه‌یافته و پروفیل سرعت تشکیل‌شده است. مقایسه نتایج، نشان‌دهنده دقت نسبتاً خوب شبیه‌سازی حاضر با داده‌های مرجع در تمامی موقعیت‌ها می‌باشد.

۷- نتایج

در این بخش نتایج حاصل از این پژوهش ارائه خواهد شد. مسئله موردنظر، شبیه‌سازی جریان سیال تحت تأثیر میدان الکترومغناطیسی به‌صورت سه‌بعدی برای لوله‌ای به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و به طول ۸۰۰ میلی‌متر بوده و تأثیر شدت میدان الکترومغناطیسی بر تغییرات پارامترهای مهم جریان سیال بررسی‌شده است. میدان الکترومغناطیسی یکنواخت به‌طور عمده در جهت شعاع لوله تنها در بخش شامل مگنت‌ها استفاده‌شده است. فرض بر این است که دیواره جریان‌سنج عایق الکتریکی است. الکترودهای تعبیه‌شده در میدان الکترومغناطیسی وظیفه اندازه‌گیری شدت محلی میدان مغناطیسی را بر عهده دارند. در ابتدا باید مقدار چگالی شار مغناطیسی بررسی شود. سپس مقدار تغییرات شدت مغناطیسی و در بخش پایانی مقدار سرعت تجزیه‌وتحلیل می‌شود. در جدول شماره (۲) خواص فیزیکی سیال نمایش داده‌شده است.

۷-۱- مکانیزم دبی سنج الکترومغناطیسی

در بخش اندازه‌گیری از دو مگنت در دیواره بالا و پایین لوله و در فاصله ۱۰۰ میلی‌متری برای ایجاد میدان الکترومغناطیسی استفاده شده است.

جدول ۲- خواص فیزیکی سیال

نوع سیال	چگالی (kg/m^3)	لزجت (kg/ms)	رسانایی الکتریکی (1/ohm-m)	نفوذپذیری مغناطیسی (h/m)
آب	۹۹۸/۲	۰/۰۰۱۰۰۳	۱۰۰۰۰۰۰	$۱/۲۶\times۱۰^{-۶}$

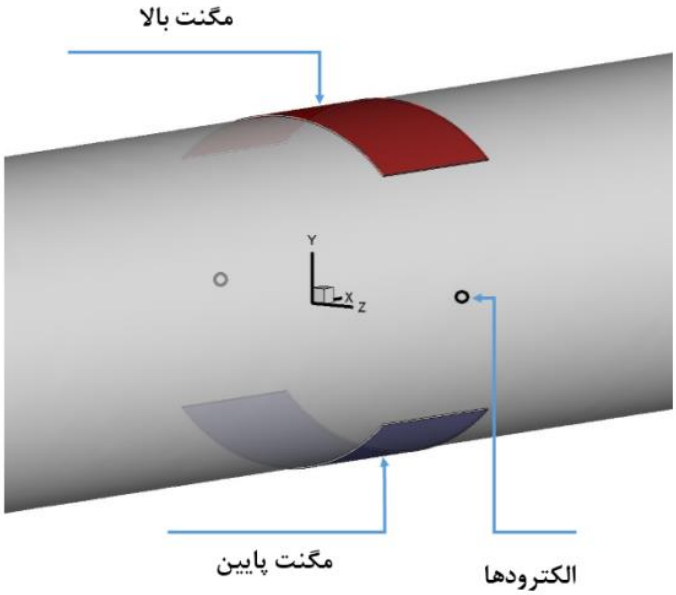
Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

الکترودها در موقعیتی عمود بر مگنت‌ها در نظر گرفته‌شده و همان‌طور که مشخص است وظیفه آن‌ها دریافت شدت القای میدان مغناطیسی تغییریافته در محل، حاصل از عبور درون سیال در حال حرکت می‌باشد. در شکل شماره (۶) محل قرارگیری مگنت‌ها و الکترودها نمایش داده‌شده است.

۷-۲- تعیین مقدار چگالی شار میدان مغناطیسی

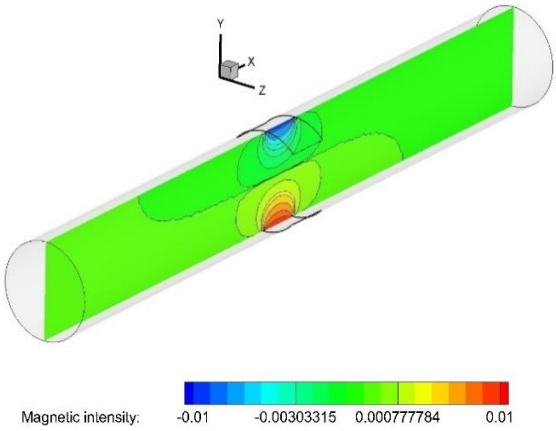
در این بخش مقدار چگالی شار مغناطیسی در جریان سیال، با استفاده از شبیه‌سازی سه‌بعدی در مقطع میانی لوله (فاصله ۴۰۰ میلی‌متری از مرز ورودی) مورد مطالعه قرارگرفته است. در شکل (۷) خطوط هم‌تراز شدت القای مغناطیسی محلی روی صفحه تقارن عرضی (در راستای محور z) و به ازای شدت میدان مغناطیسی ۰/۰۱ برای مگنت‌ها نشان داده‌شده است. شکل (۸) خطوط هم‌تراز شدت القای مغناطیسی محلی روی صفحه تقارن طولی (در راستای محور x) به ازای شدت میدان مغناطیسی ۰/۰۱ روی مگنت‌ها را نشان می‌دهد. برای ایجاد شار مغناطیسی نیاز به مگنت‌های منفی و مثبت است. در شکل‌های (۷) و (۸) طیف آبی‌رنگ قطب شمال (منفی) و طیف قرمزرنگ قطب جنوب (مثبت) بوده که در آن‌ها شدت میدان مغناطیسی در آن ناحیه بیشتر از سایر نقاط است. مگنت‌ها (آهن‌رباهای الکتریکی) برای ایجاد میدان مغناطیسی به جریان الکتریکی خارجی نیاز دارد که در این پژوهش از جریان مستقیم (DC) با مقدار ثابت ۱۲ ولت در شبیه‌سازی استفاده‌شده است. به دلیل مکانیزم جریان‌سنج مغناطیسی بایستی آب یا سیال عبوری تا اندازه‌ای خواص الکتریکی و رسانایی داشته باشد. لازم به ذکر است آب سیال حاوی رسانای الکتریکی بوده مقدار رسانایی آن بیشتر از ۵ میکرو زیمن‌س بر سانتی‌متر می‌باشد. به‌منظور مشخص کردن میزانی از شدت میدان مغناطیسی اعمالی روی مگنت‌ها به بررسی تأثیر القای مغناطیسی پرداخته‌شده است. در این راستا مقادیر متفاوتی برای شدت میدان مغناطیسی در محل مگنت‌ها در نظر گرفته‌شده که شامل ۰/۰۱، ۰/۰۳، ۰/۰۵ (کولن × متر) / (نیوتن × ثانیه) (تسلا) بوده و شبیه‌سازی جریان سیال تحت تأثیر میدان الکترومغناطیسی انجام‌شده است.



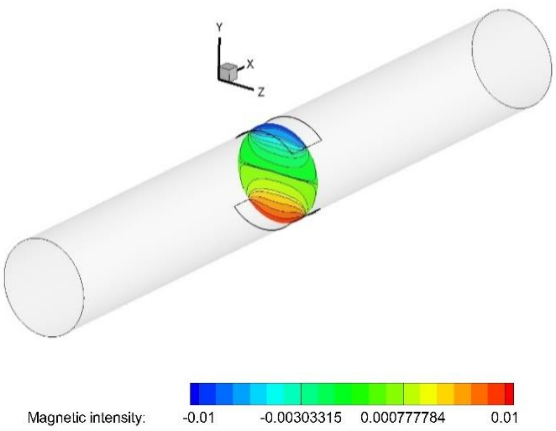
شکل ۶- مکانیزم دبی‌سنج الکترومغناطیسی

Archive of SID.ir

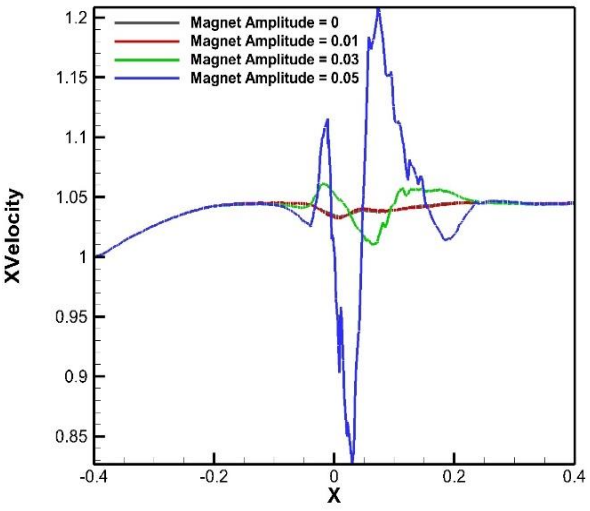
Archive of SID.ir



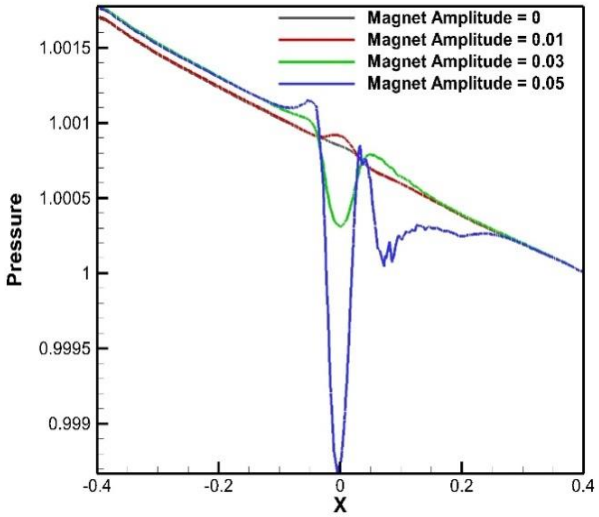
شکل ۷– خطوط هم‌تراز شدت القای مغناطیسی محلی روی صفحه تقارن عرضی



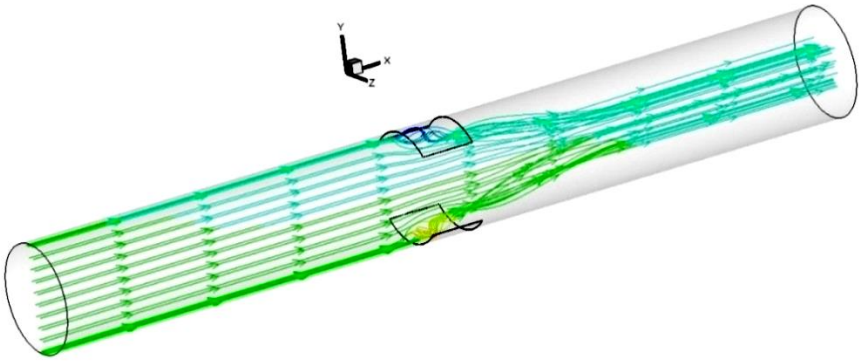
شکل ۸– خطوط هم‌تراز شدت القای مغناطیسی محلی روی صفحه تقارن طولی



شکل ۹– تأثیر شدت مغناطیسی مگنت‌ها بر تغییران مولفهٔ افقی سرعت در راستای لوله



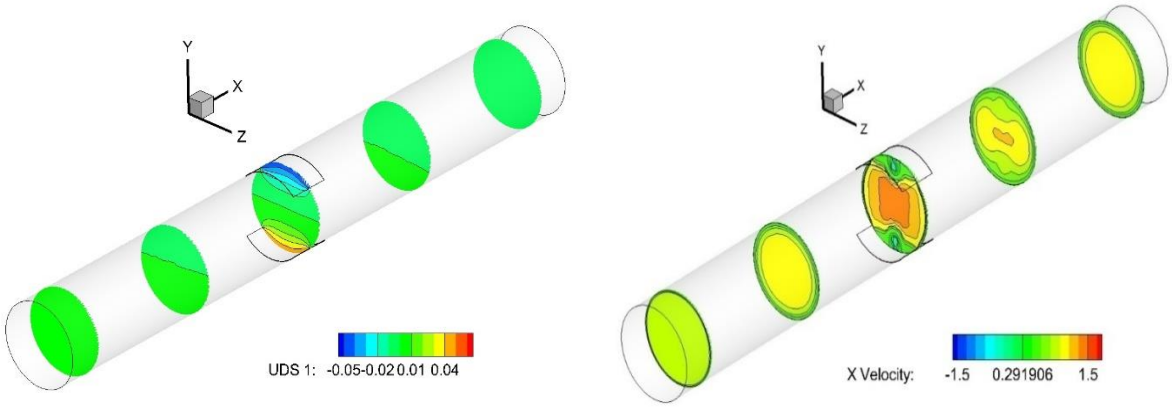
شکل ۱۰– تأثیر شدت مغناطیسی مگنت‌ها بر تغییرات فشار در راستای لوله



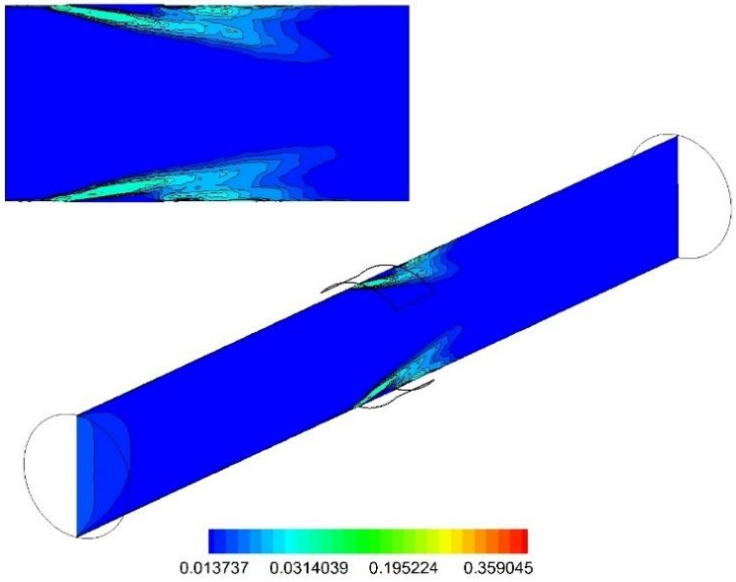
شکل ۱۱– تأثیر وجود میدان مغناطیسی با شدت بالا بر ساختار جریان درون مجرا

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir



شکل ۱۲– خطوط هم‌تراز مولفهٔ افقی سرعت(راست) و شدت میدان مغناطیسی(چپ) در مقاطع مختلف لوله در راستای محور جریان به ازای شدت میدان مغناطیسی ۰/۰۳ روی مگنت‌ها



شکل ۱۳– خطوط هم‌تراز انرژی جنبشی آشفتگی به ازای شدت میدان مغناطیسی ۰/۰۳

در شکل (۹) و (۱۰) تأثیر شدت میدان مغناطیسی مگنت‌ها بر تغییرات مولفهٔ افقی سرعت و فشار در راستای لوله نشان داده‌شده است. ابتدا برای مشخص شدن مقدار شدت مناسب، مگنت‌ها درشدت ۰/۰۱ تحلیل‌شده و نتایج نشان دادند این مقدار شدت باحالتی که مگنت‌ها بدون جریان الکتریکی هستند، تفاوت چندانی ندارد. در ادامه مقدار شدت به ۰/۰۳ افزایش یافت که مشاهدات نشان از تغییر بیشتر پارامترها نسبت به مقدار ۰/۰۱ داشته است. این مقدار در ساختار جریان تأثیر چندانی نداشته و قابل‌قبول می‌باشد. سپس شدت به مقدار ۰/۰۵ تسلا افزایش داده شد و نتایج حاصل در شکل (۹) و (۱۰) نشان از تغییر و نوسان زیاد به ازای این مقدار دارد به‌نحوی‌که در ساختار جریان تغییرات زیادی ایجاد کرده و باعث تغییر مسیر جریان در راستای لوله می‌شود.

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

همان‌طور که در شکل (۱۱) مشخص است ساختار خطوط جریان، قبل از محل اعمال میدان الکترومغناطیسی (با شدت ۰/۰۵ روی مگنت‌ها) بدون تغییر مسیر خود را ادامه می‌دهد. با نزدیک شدن به محل تحت تأثیر در شکل (۱۲)، خطوط هم‌تراز مولفهٔ افقی سرعت در مقاطع مختلف لوله در راستای محور جریان به ازای شدت میدان مغناطیسی ۰/۰۳ به نمایش گذاشته‌شده است. در ابتدای مسیر، جریان تحت تأثیر اصطکاک بین سیال و جدار داخلی لوله قرار داشته و تا مرکز مدل این پارامترها تأثیرگذار می‌باشند؛ اما با نزدیک شدن به محدوده میدان مغناطیسی (محل مگنت‌ها) تحت تأثیر شدت میدان نیز قرارگرفته و سرعت در نواحی نزدیک به محور مرکزی لوله افزایش‌یافته و در نزدیکی محل قرارگیری مگنت‌ها کمترین سرعت دیده می‌شود. در مقاطع پایین‌تر از محل قرارگیری مگنت‌ها این پدیده نیز همچنان ادامه داشته اما میزان تغییرات کمتر و ضعیف‌تر می‌باشد. شکل (۱۳)، خطوط هم‌تراز انرژی جنبشی آشفتگی به ازای شدت القای مغناطیسی ۰/۰۳ را نشان می‌دهد. در محل قرارگیری مگنت‌ها، تغییرات اندازه حرکت مشاهده‌شده که این عامل تغییرات در اثر نیروی بویانسی (لورنتس) می‌باشد.

۷-۳- مدل‌سازی دبی‌سنج الکترومغناطیسی با بهره‌گیری از الگوی ترکیبی مبتنی بر داده‌های شبیه‌سازی

به‌منظور توسعه مدل جایگزین دبی‌سنج الکترومغناطیسی از روش تخمین سرعت متوسط ورودی مبتنی بر اطلاعات داده‌های شبیه‌سازی عددی بهره گرفته‌شده است. بدین منظور برای تعدادی اختلاف فشار مشخص، شدت میدان در موقعیت حسگر به دست آورده شده سپس با استفاده از این داده‌ها تابعی برای تغییرات فشار ورودی برحسب شدت میدان مغناطیسی در محل حسگر محاسبه‌شده است. بر اساس همین الگو مقدار سرعت متوسط در ورودی و دبی جریان نیز برای این مقادیر شدت میدان مغناطیسی محاسبه‌شده‌اند. درنهایت با استفاده از این توابع، به ازای تغییر فشار در ورودی که معادل آن تغییر درشدت میدان مغناطیسی در محل حسگرها می‌باشد، مقادیر سرعت متوسط در ورودی و دبی جریان قابل‌محاسبه خواهد بود. در جدول شماره (۳) تغییرات شدت مغناطیسی پیشنهادی به ازای تغییرات فشار نمایش داده شده است.

جدول ۳- تغییرات فشار ورودی به ازای تغییرات شدت میدان مغناطیسی در محل حسگرها

فشار (پاسکال)	شدت مغناطیسی
۲۸	۰/۰۰۰۰۱۸۹۳۰۹۰۰
۲۸۸	۰/۰۰۰۰۱۸۹۳۱۵۰۰
۵۰۶	۰/۰۰۰۰۱۸۹۳۲۰۰۰
۹۴۱	۰/۰۰۰۰۱۸۹۳۳۰۰۰

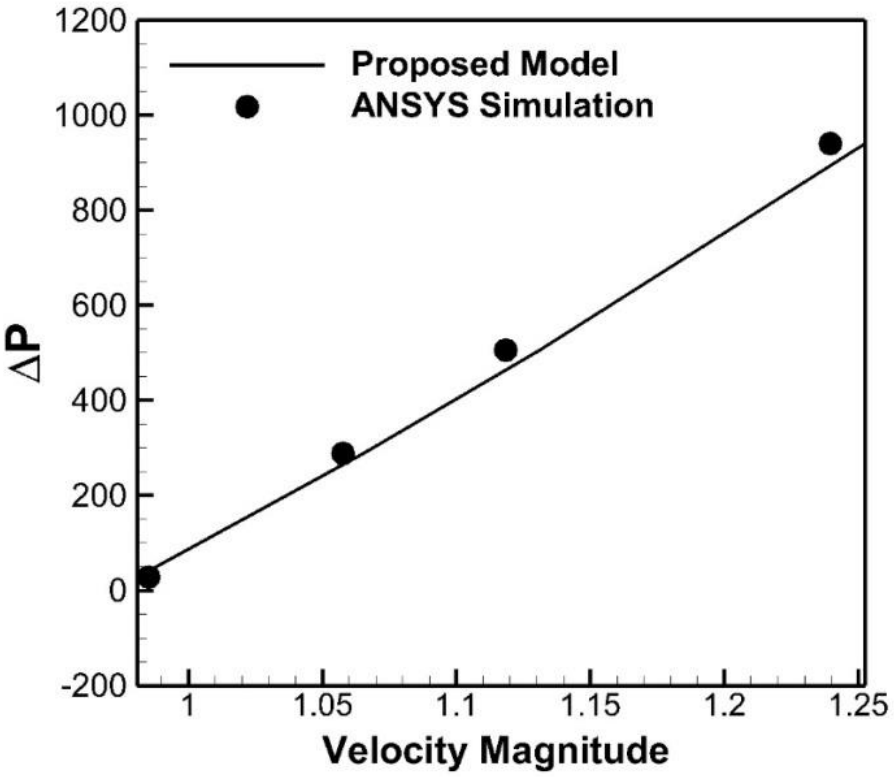
Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

به منظور بررسی صحت نتایج، به ازای مقادیر اختلاف فشار جدید و با بهره‌گیری از نرم‌افزار، مسئله شبیه‌سازی‌شده تا مقدار سرعت متوسط با این روش نیز محاسبه شود. در انتها، درصد اختلاف سرعت متوسط حاصل‌شده از روش پیشنهادی با سرعت متوسط ورودی از شبیه‌سازی مرحله دوم با یکدیگر مقایسه شده‌اند. میزان این خطا در جدول شماره (۴) نمایش داده‌شده است. مقایسه سرعت متوسط از داده حاصل‌شده از مدل پیشنهادی با شبیه‌سازی صورت گرفته با نرم‌افزار در شکل (۱۴) نشان داده‌شده است. همان‌طور که در هر شکل مشخص است دقت نتایج حاصل قابل‌قبول بوده و نشان‌دهنده قابلیت مدل ارائه‌شده می‌باشد.

جدول ۴- مقایسه داده‌های حاصل از مدل و شبیه‌سازی مستقیم

درصد خطای سرعت متوسط محاسبه‌شده با مدل و حاصل از نرم‌افزار	سرعت متوسط حاصل از شبیه‌سازی با نرم‌افزار	داده‌های حاصل از مدل		
		سرعت متوسط محاسبه‌شده با مدل	مقدار فشار	شدت مغناطیسی پیشنهادی
۰/۴۴	۰/۹۸	۰/۹۹	۲۸	۰/۰۰۰۰۱۸۹۳۰۹۰۰
-۰/۷	۱/۰۷	۱/۰۶	۲۸۸	۰/۰۰۰۰۱۸۹۳۱۵۰۰
-۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۲	۵۰۶	۰/۰۰۰۰۱۸۹۳۲۰۰۰
-۱/۰۴	۱/۲۵	۱/۲۴	۹۴۱	۰/۰۰۰۰۱۸۹۳۳۰۰۰



شکل ۱۴- مقایسه تغییرات سرعت متوسط برحسب اختلاف فشار درون مجرا حاصل از مدل پیشنهادی و شبیه‌سازی با نرم‌افزار

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

۸- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به مطالعه و شبیه‌سازی سه‌بعدی مدل دبی‌سنج الکترومغناطیسی در داخل لوله با بهره‌گیری از الگوی ترکیبی مبتنی بر داده‌های شبیه‌سازی عددی و روش‌های برازش داده برای لوله‌ای به قطر ۱۰۰ میلی‌متر و طول ۸۰۰ میلی‌متر استفاده‌شده است. در ابتدای پژوهش می‌بایست میزان مقاومت سیم‌پیچ تعیین شود به همین منظور ابتدا شبیه‌سازی جریان تحت اثر شدت الکترومغناطیسی در مقدار ۰/۰۱، ۰/۰۳ و ۰/۰۵ (تسلا) موردبررسی قرارگرفته شد تا مناسب‌ترین شدت به دست آید. نتایج حاصل‌شده نشان می‌دهند تا شدت ۰/۰۳، میدان مغناطیسی در ساختار جریان تأثیر چندانی نداشته اما با افزایش مقدار شدت به میزان ۰/۰۵ تأثیرات قابل‌توجه بوده تا حدی که باعث ایجاد تغییر فراوان در ساختار شده و در نزدیکی مگنت‌ها باعث برگشت جریان نیز می‌شود. درنتیجه مناسب‌ترین شدت مغناطیسی برای این مدل در محدوده ۰/۰۳ مدنظر قرارگرفته شد. به‌منظور توسعه مدل جایگزین دبی‌سنج الکترومغناطیسی از روش تخمین سرعت متوسط ورودی مبتنی بر اطلاعات داده‌های شبیه‌سازی عددی بهره گرفته‌شده است. در انتها، درصد اختلاف سرعت متوسط حاصل‌شده از روش پیشنهادی با سرعت متوسط ورودی از شبیه‌سازی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. دقت نتایج حاصل‌شده مدل پیشنهادی بسیار بالا بوده و مشخصاً نشان‌دهنده قابلیت این مدل می‌باشد.

مراجع

[1] Nashed, M., "Solution of the Electromagnetic Flowmeter Equation", IOPScience Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 5, No. 5, (1972).

[2] O'Sullivan, V.T., and Wyatt, D.G., "Computation of Electromagnetic Flowmeter Characteristics from Magnetic Field Data. III. Rectilinear Weight Functions", IOPScience Journal of Physics D: Applied Physics, Vol. 16, No. 8, pp. 1461-1476, (1988).

[3] Luntta, E., and Halttunen, J., "The Effect of Velocity Profile on Electromagnetic Flow Measurement", Sensors and Actuators, Vol. 16(4), pp. 335-344, (1989).

[4] Lim, K.W., and Chung, M.K., "Numerical Investigation on the Installation Effects of Electromagnetic Flowmeter Downstream of a 90° Elbow-laminar Flow Case", Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 10, No. 3, pp. 167–174, (1999).

[5] Horner, B., "A Novel Profile-insensitive Multi-electrode Induction Flowmeter Suitable for Industrial Use", Measurement, Vol. 24(3), pp. 131-137, (1998).

[6] Michalski, A., Starzyński, J., and Wincenciak, A., "3-D Approach to Designing the Excitation Coil of an Electromagnetic Flowmeter", Journal of Transactions on Instrumentation and Measurement, IEEE, Vol. 51, No. 4, pp. 833-839, (2002).

[7] Xu, L.J., Li, X.M., Dong, F., Wang, Y., and Xu, L.A., "Optimum Estimation of the Mean

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

Flow Velocity For the Multi-electrode Inductance Flowmeter", IOPScience Journal of Measurement Science and Technology, Vol. 12, No. 8, pp. 1139-1146, (2001).

[8] Xu, L., Han, J., and Wang, Y., "Design of Electrode Array of Inductance Flowmeter", IEEE Sensors Journal, Vol. 5, No. 5, pp. 929-933, (2005).

[9] Thess, A., Votyakov, E.V., and Kolesnikov, Y., "Lorentz Force Velocimetry", APS Journal of Physical Review Letters, Vol. 96, No. 16, pp. 1-4, (2006).

[10] Karamifard, M., Kazeminejad, M., and Maghsoodloo, A., "Design and Simulation of Electromagnetic Flow Meter for Circular Pipe Type", International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering, Vol. 5, No. 2, pp. 416-421, (2011).

[11] Lu, B., Xu, L., and Zhang, X., "Three-dimensional MHD Simulations of the Electromagnetic Flowmeter for Laminar and Turbulent Flows", Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 33, pp. 239-243, (2013).

[12] Cao, Z., Song, W., Peng, Z., and Xu, L., "Coil Shape Optimization of the Electromagnetic Flowmeter for Different Flow Profiles", Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 40, pp. 256-262, (2014).

[13] Martim, A.L.S.S, Dalfré Filho, J.G., De Lucca, Y.F.L., and Borri Genovez, A.I., "Electromagnetic Flowmeter Evaluation in Real Facilities: Velocity Profiles and Error Analysis", Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 66, pp. 44-49, (2019).

[14] Palau, C.V., Do Bomfim, G.V., De Azevedo, B.M., and Peralta, I.B., "Numerical Study of Upstream Disturbances on the Performance of Electromagnetic and Ultrasonic Flowmeters", Scientia Agricola, Vol. 77, No. 4, pp. 1-8, (2020).

[15] Ge, L., Chen, J., Tian, G., Ahmed, J., and Huang, Q., "Study on a New Electromagnetic Flowmeter Based on Three-value Trapezoidal Wave Excitation", Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 78, Article Number. 101882 (2021).

[16] Shercliff, J.A, "*The Theory of Electromagnetic Flow-measurement*", Cambridg Science Classics, Fellow of Trinity College and Lecturer in the Department of Engineering University of Cambridge, Cambridge University Press, pp. 143, (1962).

فهرست نمادهای انگلیسی

V سرعت جریان سیال، m/s

p فشار استاتیک جریان سیال، Pa

ρ چگالی سیال مرجع، kg/m3

J چگالی جریان الکتریکی

k نرخ انرژی جنبشی

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

ε نرخ اضمحلال آشفتگی

U القای ولتاژ

D فاصله الکترودها، m

K ضریب ثابت

E شدت میدان الکتریکی

C_1 و C_2 ضرایب ثابت

ν لزجت سینماتیکی

k ثابت ون کارمن

G_k ترم تولید انرژی ناشی از گرادیان‌های سرعت متوسط جریان

G_b ترم تولید انرژی ناشی از بویانسی

u_i سرعت متوسط ورودی سیال m/s

J چگالی جریان الکتریکی

Archive of SID.ir

Archive of SID.ir

Abstract

Electromagnetic flowmeters are high-precision devices that can be used to measure fluid flow in engineering systems, including municipal water supply networks. In this research, electromagnetic flowmeter modeling has been used which is a hybrid model based on numerical simulation results of turbulent flow and data estimation method for a pipe with a diameter of 100mm and a length of 800mm. The numerical model is built using three-dimensional simulation framework by creating a magnetic field in the center of the geometry and measuring the volume flow rate using Faraday law and Maxwell equations. In fact, the physics of the problem is such that to measure the flow rate of a fluid, a magnetic field was created in the center of the geometry where the electromagnetic inductors are located. By moving the fluid that has electrical conductivity, the intensity of electromagnetic induction was obtained at that point and the amount of velocity and flow rate was calculated using these data. For this purpose, current simulation under the effect of electromagnetic intensity was performed for the values of 0.01, 0.03 and 0.05 (Tesla) to obtain the most appropriate intensity. The results show that up to an intensity of 0.03, the magnetic field has little effect on the structure of the flow field. In order to develop an alternative model of electromagnetic flowmeter, the method of estimating the inlet average velocity based on information from numerical simulation data has been used. First, for a certain number of pressures (pressure differences), the magnetic field intensity in the position of the sensors was obtained then using these values, the inlet average velocity using direct numerical simulation was calculated. A new magnetic intensity different from the values used was obtained by data mining method. In order to ensure the accuracy of the results, the obtained data were compared with the calculated values of the software.

Archive of SID.ir