

شبیه‌سازی CFD تأثیر پارامترهای هندسی بر تقسیم جریان گاز بین مسیر اصلی و کنارگذر در جریان سنج‌های میکروترمال برای مصارف خانگی

وحید کرمانی^۱، سید حسن هاشم‌آبادی^{۱*} و سیدمحمد میرنجفی‌زاده^۲

۱- آزمایشگاه تحقیقاتی دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)، دانشکده مهندسی شیمی، نفت و گاز، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران

۲- پژوهشکده اندازه‌گیری جریان سیالات، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- شرکت ملی گاز استان تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۸/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۵

چکیده

اندازه‌گیری دقیق جریان گاز یک نیاز اساسی در مصارف خانگی است. در حال حاضر، از کنتورهای گاز دیافراگمی جهت اندازه‌گیری مصارف خانگی گاز استفاده می‌شود که یک فناوری بسیار قدیمی و کم‌دقت است. در سال‌های اخیر، استفاده از جریان‌سنج میکروترمال به دلیل اندازه کوچک، توان مصرفی پایین و دقت مناسب در حال رشد است اما بازه اندازه‌گیری محدود آن‌ها، مانع از به‌کار بردن این جریان‌سنج‌ها در اندازه‌گیری مصارف خانگی گاز است. جهت رفع این محدودیت در پژوهش حاضر، به معرفی سیستم مسیر کنارگذر مشابه با جریان‌سنج‌های لوله مویین پرداخته شد که در چند جریان‌سنج میکروترمال تجاری نیز استفاده شده است. این سیستم در جریان‌سنج‌های میکروترمال می‌بایست به گونه‌ای طراحی شود که دبی قابل قبولی وارد مسیر کنارگذر (میکروکانال) شود. بنابراین در این پژوهش برای اولین بار تأثیر پارامترهای هندسی مختلف بر میزان جریان گاز ورودی به مسیر کنارگذر در محدوده دبی مصارف خانگی با حل هم‌زمان معادلات جریان مغشوش و آرام از طریق شبیه‌سازی دینامیک سیالات مورد مطالعه قرار گرفت. طبق نتایج با بزرگ‌تر بودن ارتفاع مسیر کنارگذر، کمتر بودن قطر لوله‌های المان آرام‌ساز جریان و کمتر بودن فاصله آن با ورودی و خروجی مسیر کنارگذر دبی گاز بیشتری وارد مسیر کنارگذر می‌شود. در نهایت، ارتفاع میکروکانال $160 \mu\text{m}$ ، فاصله 2 mm ورودی و خروجی مسیر کنارگذر از المان آرام‌ساز و چینش مربعی المان آرام‌ساز با قطر لوله‌های $1/8 \text{ mm}$ پیشنهاد شد. در این مشخصات، 100 تا 200% نسبت به اکثر پیکربندی‌های دیگر کار حاضر، دبی بیشتری وارد مسیر کنارگذر می‌شود.

کلمات کلیدی: شبیه‌سازی عددی، مسیر کنارگذر، کنتور گاز، جریان‌سنج حرارتی، میکروکانال

مقدمه

مصرف انرژی در دنیا، نگرانی‌های محیط زیستی و افزایش مصارف محصولات شیمیایی، می‌تواند گاز را یک منبع انرژی در عرصه اقتصاد جهانی در نظر گرفت [۱]. تولید و مصرف گاز روزبه‌روز در حال افزایش است و مهم‌تر از همه اینکه قسمت قابل

با توجه به تحولات در بخش انرژی از جمله نیاز به تأمین منابع متنوع انرژی ایمن، رشد فزاینده

*مسئول مکاتبات

آدرس الکترونیکی: hashemabadi@iust.ac.ir
شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2021.4326.2963)

[۱۳] و تشخیص جریان برگشتی [۱۴] اشاره نمود. این نوع از جریان‌سنج‌ها با توجه به اندازه‌ی بسیار کوچک و مصرف انرژی پایین، گرمای کمی را تولید می‌کنند. بنابراین، جهت اندازه‌گیری حجم گاز جاری در لوله‌های گاز خانگی نمی‌توان آن‌ها را مستقیماً مورد استفاده قرار داد. هر چند نمونه‌هایی مانند [۱۵] ساخته شده‌اند که مستقیماً در لوله‌های بزرگ قرار می‌گیرند ولی دارای توان مصرفی بالایی هستند و مناسب جهت استفاده در اندازه‌گیری گاز مصارف خانگی نمی‌باشند زیرا به‌دلیل مسائل ایمنی، می‌بایست جریان‌سنج‌های گاز جهت تأمین الکتریسیته از باتری استفاده کنند. بنابراین توان مصرفی پایین جریان‌سنج، عملکرد چندساله آن را در اندازه‌گیری مصارف خانگی گاز تضمین می‌نماید. معمولاً برای افزایش دقت جریان‌سنج‌های میکروترمال و کاهش توان مصرفی آن‌ها از میکروکانال‌های مجتمع شده با جریان‌سنج استفاده می‌شود که باعث می‌شود محدوده اندازه‌گیری آن‌ها کاهش یابد [۱۶ و ۱۷]. از این رو به‌تنهایی قادر به اندازه‌گیری نرخ‌های بالای جریان و یا بازه‌های وسیع در مصارف خانگی نیستند. یکی از روش‌های افزایش بازه اندازه‌گیری جریان استفاده از مسیر کنارگذر^۱ است. افزایش توانایی اندازه‌گیری بازه وسیع توسط مسیر کنارگذر توسط اتسباریا و همکاران [۱۸] نشان داده شده است. در این جریان‌سنج حد بالای بازه اندازه‌گیری تا ۱۰۰ برابر بیشتر شد که این کار توسط اضافه نمودن یک مسیر کنارگذر بزرگ‌تر از کانال اصلی صورت گرفت. این مسیر باعث می‌شود که قسمت اعظمی از جریان از این مسیر عبور کند. بنابراین با متصل نمودن جریان‌سنج میکروترمال به مسیر کنارگذر که همان میکروکانال مجتمع شده با جریان‌سنج است، می‌توان آن را برای استفاده در اندازه‌گیری مصارف خانگی گاز به کار برد.

توجهی از مصرف آن به بخش خانگی تعلق دارد به‌طوری‌که سهم مصارف خانگی از مصرف گاز در جهان از ۲۲/۸٪ به ۳۰٪ افزایش پیدا کرده است [۲]. به‌دنبال افزایش مصرف گاز، استفاده از کنتورهای گاز نیز افزایش پیدا می‌کند. ارزش بازار کنتورهای گاز به میزان ۳۷۷۶/۰۷ میلیون دلار آمریکا بوده است و پیش‌بینی شده است که ارزش این بازار به ۸۱۵۲/۶۳ میلیون دلار آمریکا افزایش یابد که بیشترین سرعت رشد مربوط به بخش خانگی است. سهم کنتورهای گاز برای بخش‌های خانگی، تجاری و صنعتی به ترتیب برابر با ۲۲/۶۸٪، ۳۳/۳۱٪ و ۴۴/۰۱٪ بود [۳]. بنابراین مهم است که روش‌های مناسب اندازه‌گیری جهت اندازه‌گیری مصارف خانگی گاز توسعه داده شوند. اندازه‌گیری جریان گاز در بخش خانگی، به‌طور سنتی توسط کنتورهای دیافراگمی با مقیاس وسیع پیاده‌سازی می‌شود. این کنتورها دقت کافی در اندازه‌گیری گاز را ندارند و عواملی مانند دما [۴]، عمر کنتور [۵] و وجود قطعه متحرک مکانیکی [۶] باعث ایجاد خطا در اندازه‌گیری جریان گاز می‌شوند. همچنین در صنعت نیز جریان‌سنج‌های اوریفیسی و توربینی کاربرد دارند که جریان‌سنج اوریفیسی دارای افت فشار زیادی است [۷] و پدیده کاویتاسیون نیز بر عملکرد جریان‌سنج توربینی تأثیر قابل توجهی دارد [۸]. در چند سال اخیر، افزایش مهارت در روش‌های مدرن ایجاد ساختارهای میکرو باعث پیشرفت در توسعه‌ی بسیاری از جریان‌سنج‌های میکرو براساس فناوری MEMS^۱ در کاربردهای خانگی، صنعتی و پزشکی گردیده است [۹-۱۱]. این‌گونه جریان‌سنج‌ها به دو گروه حرارتی و غیرحرارتی تقسیم‌بندی می‌شوند [۱۲]. نوع حرارتی آن که به اسم جریان‌سنج میکرو ترمال^۲ شناخته می‌شود به‌دلیل فقدان قطعه متحرک مکانیکی از استقبال بیشتری برخوردار است و به سه‌دسته سیم یا فیلم داغ، گرماسنجی و زمان پرواز تقسیم‌بندی می‌شود [۱۲]. از مزایای این نوع جریان‌سنج می‌توان به‌دقت بالا، توان مصرفی کم

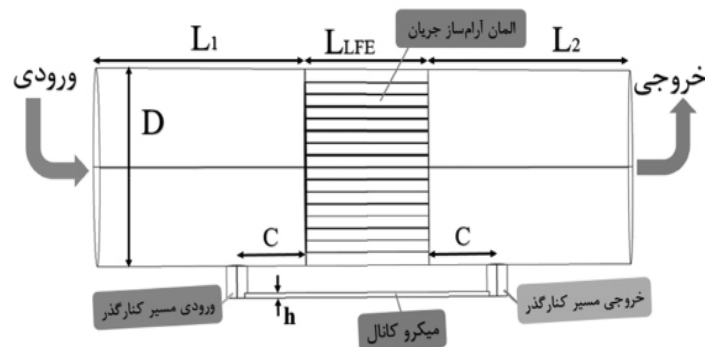
1. Micro Electro Mechanical Systems
2. Micro Thermal Flowmeter
3. Bypass

دینامیک سیالات محاسباتی استفاده شده است. در ادامه ابتدا به معرفی قسمت‌های مختلف سیستم ارائه شده و پارامترهای هندسی مورد نظر جهت بررسی تأثیر آن‌ها بر هیدرودینامیک جریان گاز می‌پردازیم. سپس معادلات حاکم بر مسأله و شرایط مرزی مورد نیاز توضیح داده شده است و در نهایت به بحث و نتیجه‌گیری در رابطه با نتایج شبیه‌سازی پرداخته می‌شود.

تعریف مسأله

همان‌طور که ذکر شد نمی‌توان جریان‌سنج‌های میکروترمال را به‌طور مستقیم در لوله‌های بزرگ به کار برد. یکی از روش‌های کاربردی جهت حل این مشکل استفاده از یک جریان‌کنارگذر (میکرو کانال) است. در شکل ۱ هندسه سیستم پیشنهادی جهت به‌کارگیری جریان‌سنج‌های میکروترمال در مصارف خانگی نشان داده شده است. این سیستم شامل لوله اصلی، المان آرام‌ساز جریان، لوله‌های رابط و میکروکانال (مسیر کنارگذر) است. المان قرارگرفته شده در مرکز لوله اصلی یک نوع یکنواخت‌کننده جریان^۳ است که وظیفه حذف کردن حرکت چرخشی سیال و نامتقارنی آن را دارد. اما برای اینکه نسبت ثابتی از جریان بین لوله اصلی و مسیر کنارگذر تقسیم شود باید رژیم جریان در هر دو مسیر آرام باشد [۱۸ و ۲۰].

بدین صورت این جریان‌سنج به جریان‌سنج‌های حرارتی لوله موئین^۱ شبیه می‌شوند. همچنین استاندارد ISO 14511 که مربوط به جریان‌سنج حرارتی لوله موئین است نیز المان‌های مورد نیاز جهت به‌کارگیری مسیر کنارگذر را شرح داده است که براساس آن المان تأثیرگذار بر هیدرودینامیک سیال هنگام تقسیم جریان بین دو مسیر اصلی و کنارگذر، المان آرام‌ساز جریان^۲ است. پرویزی و همکاران [۱۹] و فرزانه‌گرد و همکاران [۲۰] جریان‌سنج‌های حرارتی لوله موئین مشابه با این استاندارد ارائه نموده‌اند که به مدل‌سازی آن و بررسی تجربی تأثیر جریان‌ساز و تأثیر درصد ترکیب گاز بر عملکرد جریان‌سنج پرداخته‌اند. سیستم کنارگذر برای جریان‌سنج لوله موئین در مطالعات پیشین بررسی شده و در چندین جریان‌سنج میکروترمال تجاری نیز استفاده شده است اما تاکنون به تأثیر پارامترهای مختلف هندسی اجزای این نوع سیستم بر مقدار تقسیم جریان بین دو مسیر توجه نشده است. بنابراین در این پژوهش برای اولین بار تأثیر پارامترهای هندسی مانند ضخامت مسیر کنارگذر، موقعیت آن و پارامترهای هندسی المان آرام‌ساز جریان بر مقدار گاز ورودی به مسیر کنارگذر طراحی شده جهت به‌کارگیری جریان‌سنج‌های میکروترمال برای مصارف خانگی بررسی شد. به‌دلیل کاهش هزینه‌ها از روش



شکل ۱ نمای جانبی سیستم طراحی شده برای به‌کار بردن جریان‌سنج میکروترمال در مصارف خانگی

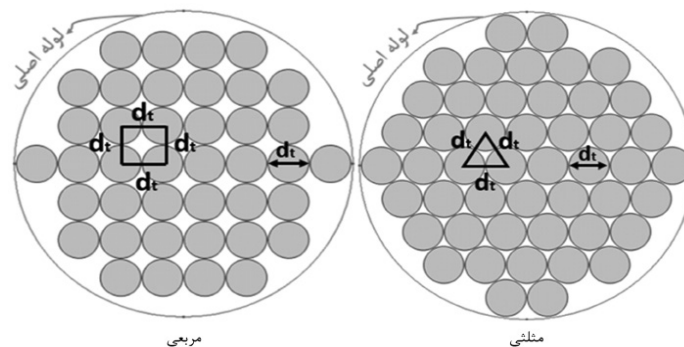
1. Capillary Tube Thermal Flowmeter
2. Laminar Flow Element (LFE)
3. Flow Conditioner

(C)، چینش و قطر (d_t) لوله‌های دسته لوله المان آرام‌ساز جریان پرداخته شد. ابتدا مقادیر مختلف h و C با در نظر گرفتن چینش مثلثی و سپس مقادیر مختلف d_t در چینش‌های مثلثی و مربعی لوله‌ها بررسی شد. ابعاد این هندسه و شرایط ورودی در جدول ۱ آورده شده است. مقادیر h با توجه به مقادیر استفاده شده در کار [۱۶] و مقادیر d_t براساس لوله‌های موجود در بازار انتخاب شده‌اند. اولین مقدار C از نزدیک ترین مکان ممکن به المان آرام‌ساز جریان انتخاب شده و بقیه مقادیر با فاصله ۱ mm از آن دور شده است. جهت حذف تاثیر خروجی لوله و اینکه جریان گاز قبل از ورودی به مسیر کنارگذر کاملاً توسعه یافته باشد، لوله‌های اصلی قبل و بعد از المان آرام‌ساز به اندازه کافی طولانی در نظر گرفته شده است.

معادلات حاکم و شرایط مرزی

جهت بررسی هیدرودینامیک سیال در لوله اصلی و مسیر کنارگذر از معادلات ناویر استوکس و پیوستگی استفاده شده است. مسأله از نظر معادلات به کار گرفته شده جهت مدل‌سازی و شبیه‌سازی این سیستم در بازه دبی ذکر شده، به دو قسمت تقسیم می‌شود. قسمت اول مربوط به بازه دبی $0/04$ تا $2/3 \text{ m}^3/\text{h}$ است که رژیم جریان در تمام نقاط سیستم، آرام است. قسمت دوم مربوط به بازه دبی $2/3$ تا $6 \text{ m}^3/\text{h}$ است.

بنابراین در این سیستم از نوع دسته لوله‌ای این المان که آرام‌ساز جریان نام دارد، استفاده می‌شود تا رژیم جریان موازی مسیر کنارگذر در لوله اصلی به شکل آرام باشد. ترتیب قرارگیری لوله‌های دسته لوله^۱ می‌تواند متفاوت باشد که در کار حاضر طبق شکل ۲ دو نوع چینش مثلثی و مربعی در قطرهای مختلف لوله‌های دسته لوله بررسی می‌شود. به دلیل روش ساخت میکروکانال و هندسه آن لازم است از یک جفت لوله رابط برای ورودی و خروجی کانال میکرو جهت اتصال به لوله اصلی استفاده شود. موقعیت مسیر کنارگذر نسبت به المان آرام‌ساز جریان (C) بر میزان دبی ورودی به مسیر کنارگذر مؤثر است. منظور از موقعیت مسیر کنارگذر، فاصله ورودی و خروجی مسیر کنارگذر (لوله‌های رابط) از المان آرام‌ساز است که این دو فاصله با یکدیگر برابر هستند. ظرفیت عملیاتی کنتورهای مختلف گاز توسط عبارت جی-ریت^۲ بیان می‌شود. جی-ریت با حرف G به همراه یک عدد که بیانگر سایز کنتور گاز است نشان داده می‌شود. کنتورهای خانگی در محدوده $G4$ قرار می‌گیرند که قطر لوله متصل به آن ۲۵ mm و دبی حداقل و حداکثر آن به ترتیب $0/04$ و $6 \text{ m}^3/\text{h}$ است [۲۱]. در این شبیه‌سازی هدف بررسی پارامترهای تاثیر گذار بر نسبت تقسیم جریان بین مسیر اصلی و مسیر کنارگذر است. جهت دستیابی به این مهم به بررسی چهار پارامتر ضخامت کانال (h)، موقعیت مسیر کنارگذر



شکل ۱ انواع مختلف چینش لوله‌های المان آرام‌ساز جریان

1. Tube Bundle
2. G-rate

جدول ۱ ابعاد هندسه طراحی شده برای به کار بردن جریان‌سنج‌های میکروترمال در مصارف خانگی

ردیف	پارامتر	نماد	واحد	مقدار
۱	ضخامت کانال	h	μm	۲۴۰، ۱۶۰، ۸۰
۲	موقعیت مسیر کنارگذر	C	mm	۶، ۴، ۲
۳	چینش دسته لوله	-	-	مثلثی و مربعی
۴	قطر لوله‌های دسته لوله	d_t	mm	۶، ۳، ۱/۸
۵	طول المان آرام‌ساز جریان	L_{LFE}	mm	۱۸
۶	طول لوله قبل از المان آرام‌ساز	L_1	mm	۱۲۵۰
۷	طول لوله بعد از المان آرام‌ساز	L_2	mm	۵۰۰
۸	قطر لوله اصلی	D	mm	۲۵
۹	دبی ورودی	Q	m^3h^{-1}	۰/۰۴-۶
۱۰	دمای ورودی	T_0	$^{\circ}\text{C}$	۲۵

نرم‌افزار کامسول^۳ نسخه ۳/۲ حل شدند.

معادلات حاکم

مدل اغتشاش $k-\varepsilon$ یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین مدل‌های اغتشاش است که دو معادله انتقال اضافی برای بیان رفتار جریان مغشوش به مجموعه معادلات حاکم اضافه می‌کند. مدل استاندارد $k-\varepsilon$ برای شبیه‌سازی جریان مغشوش در لوله‌های دارای المان یکنواخت کننده‌ی جریان مناسب است [۲۲]. این مدل در واقع اثرات ناشی از جابه‌جایی و نفوذ انرژی اغتشاش را از طریق دو معادله انتقال اضافی انرژی جنبشی اغتشاش (k) و تلفات انرژی جنبشی ناشی از اغتشاش (ε) لحاظ می‌کند. این مدل یک مدل نیمه تجربی بوده و مشتقات معادلات مدل بر پایه ملاحظات پدیده شناسی و تجربیات اکتسابی استخراج شده است. در این مدل رابطه انتقالی k از یک رابطه دقیق ریاضی استخراج شده است درحالی‌که ε از بررسی تجربی رابطه دقیق پایه مرتبط به دست آمده است. معادلات حل شده توسط مدل جریان آشفته، معادلات ناپیر استوکس (RANS) برای بقای مومنتوم و رابطه پیوستگی برای بقای جرم است.

که رژیم جریان در لوله اصلی، مغشوش و در المان آرام‌ساز جریان و میکروکانال، آرام است. معادلات مربوط به رژیم آرام و مغشوش در قسمت دوم مدل‌سازی به صورت هم‌زمان حل می‌شوند. در جدول ۲ عدد رینولدز جریان ورودی به کنتور و عدد رینولدز جریان درون لوله‌های المان آرام‌ساز جریان محاسبه شده است تا از آرام بودن جریان در المان آرام‌ساز اطمینان حاصل شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود در بازه ۰/۰۴ تا $6 \text{ m}^3/\text{h}$ که مربوط به ظرفیت کنتورهای G4 است رژیم جریان پس از تقسیم در لوله‌های المان آرام‌ساز، آرام می‌شود. بنابراین در قسمت اول که تنها مدل‌سازی جریان آرام صورت می‌گیرد به دو شرط مرزی برای ورودی و خروجی نیاز است در صورتی که در قسمت دوم با توجه به اینکه که مدل‌سازی جریان آشفته و آرام به صورت هم‌زمان انجام می‌شود، دامنه محاسباتی به دو بخش آرام و مغشوش تقسیم می‌شود که برای هر بخش به دو شرط مرزی ورودی و خروجی نیاز است. البته به دلیل تقارن هندسه در هر دو قسمت شرط مرزی تقارن^۱ اعمال شده است. در ادامه روابط مورد نیاز جهت شبیه‌سازی CFD و شرایط مرزی در این سیستم توضیح داده شده است. این معادلات به روش المان محدود^۲ توسط

1. Symmetry
2. Finite Element Method (FEM)
3. COMSOL Multiphysics

جدول ۲ مقدار عدد رینولدز در ورودی کنتور و لوله‌های المان آرام‌ساز جریان در دبی‌های مختلف

عدد Re در d مختلف						عدد Re در ورودی	Q(m ³ /h)
چینش مربعی			چینش مثلثی				
۶ mm	۳ mm	۱/۸ mm	۶ mm	۳ mm	۱/۸ mm		
۱/۸۹	۰/۴۵	۰/۱۵	۱/۷۴	۰/۴۳	۰/۱۶	۲۲/۶۵	۰/۰۲۵
۱۵۰/۹۸	۳۶/۲۴	۱۲/۳۳	۱۳۹/۳۷	۳۴/۱۹	۱۲/۵۰	۱۸۱۱/۸۱	۲
۴۵۲/۹۵	۱۰۸/۷۱	۳۶/۹۸	۴۱۸/۱۱	۱۰۲/۵۶	۳۷/۴۹	۵۴۳۵/۴۳	۶
۹۵۴/۹۲	۱۸۱/۱۸	۶۱/۶۳	۶۹۸/۸۵	۱۷۰/۹۳	۶۲/۴۸	۹۰۵۹/۰۴	۱۰

رابطه پیوستگی در رابطه ۷ آورده شده است.

$$\frac{\partial \tilde{n}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (7)$$

از آنجایی که مسأله پایا است، بنابراین تمام ترم‌های وابسته به زمان در روابط ۱، ۳، ۴ و ۷ حذف می‌شوند. مدل مورد استفاده برای مدل‌سازی جریان آرام همان مدل جریان آشفته با حذف ترم‌های تنش رینولدز است. این شبیه‌سازی با جریان هوا انجام شده است و خواص فیزیکی مورد نیاز هوا برای حل این روابط عبارت‌اند از چگالی و ویسکوزیته که مقادیر آن در دمای ۲۵ °C به ترتیب برابر با ۱/۱۸۴ kg.m⁻³ و ۱/۸۵×۱۰^{-۵} kg.m⁻¹.s⁻¹ است.

شرایط مرزی

ناحیه آرام با توجه به قطر ۲۵ mm لوله اصلی از دبی ۰/۰۴ تا ۲/۳ m³/h و ناحیه مغشوش از ۲/۳ تا ۶ m³/h است. در ادامه، شرایط مرزی برای ورودی، خروجی، صفحه قرینه و سطح مشترک بین محدوده آرام و مغشوش در **جدول ۳** آورده شده و توضیح داده شده است.

ورودی لوله اصلی:

از آنجایی که دبی‌های ورودی مشخص هستند بنابراین شرط مرزی ورودی لوله، سرعت متوسط (U₀) دبی‌های حجمی با توجه به سطح مقطع لوله در نظر گرفته شده است که طبق رابطه ۸ محاسبه می‌شود.

$$U_0 = \frac{Q}{\pi R^2} \quad (8)$$

رابطه ناویر استوکس برای جریان مغشوش در رابطه ۱ و پارامتر لزجت آشفتگی در رابطه ۲ آورده شده است.

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot [-PI + (\mu + \mu_t)(\nabla u + (\nabla u)^T)] + F \quad (1)$$

$$\mu_t = \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (2)$$

ترم F در اثر نیروهای حجمی مانند گرانش در رابطه قرار می‌گیرد که در این مسأله از گرانش صرف نظر شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود پارامتر (μ_t) لزجت آشفتگی تابع انرژی جنبشی اغتشاش (k) و تلفات انرژی جنبشی ناشی از اغتشاش (ε) است که نحوه محاسبه آن‌ها به ترتیب در روابط ۳ و ۴ آورده شده‌اند.

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)k = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + P_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)\varepsilon = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + X_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{K} \Pi_k - X_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{K} \rho \quad (4)$$

ترم P_k، تولید انرژی ناشی از گرادیان‌های سرعت متوسط جریان است که به صورت رابطه ۵ محاسبه می‌شود.

$$P_k = \mu_t \left(\nabla u : (\nabla u + (\nabla u)^T) \right) \quad (5)$$

ثوابت روابط ۱ تا ۴ در رابطه ۶ آورده شده است. این مقادیر، مقادیر پیش‌فرض نرم‌افزار هستند که با استفاده از داده‌های مختلف تجربی از انواع جریان‌ها به دست آورده شده‌اند.

$$C_{\varepsilon 1} = 1.44, C_{\varepsilon 2} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad (6)$$

جدول ۳ شرایط مرزی استفاده شده در تمامی نواحی محاسباتی

محل	شرط مرزی
ورودی	$u = U_0, k = 0.005 m^2 s^{-2}, \varepsilon = 0.005 m^2 s^{-3}$
خروجی	$P = P_0, \nabla k = 0, \nabla \varepsilon = 0$
صفحه قرینه	$\nabla u.n = 0, \nabla k.n = 0, \nabla \varepsilon.n = 0$
سطح مشترک از مغشوش به آرام	$u_{turb} = u_{lam}, v_{turb} = v_{lam}, w_{turb} = w_{lam},$ $\nabla k.n = 0, \nabla \varepsilon.n = 0$
سطح مشترک از آرام به مغشوش	$u_{turb} = u_{lam}, v_{turb} = v_{lam}, w_{turb} = w_{lam},$ $k = 0.005 m^2 s^{-2}, \varepsilon = 0.005 m^2 s^{-3}$

کاهش عدد رینولدز مواجه شده و رژیم جریان به آرام تبدیل می‌شود. بنابراین هندسه به دو بخش با رژیم جریان مغشوش و دو بخش با رژیم جریان آرام تقسیم‌بندی می‌شود و خروجی یک بخش، ورودی بخش دیگر است. بنابراین جهت ارتباط بین این دو مدل، از شرط مرزی سرعت برابر در سطح مشترک این دو ناحیه استفاده شده است. شرط مرزی در سطح مشترک نواحی آرام و مغشوش همان‌طور که در رابطه ۱۲ بیان می‌شود، برابری مؤلفه‌های سرعت است.

$$\begin{cases} u_{turb} = u_{lam} \\ v_{turb} = v_{lam} \\ w_{turb} = w_{lam} \end{cases} \quad (12)$$

همچنین برای پارامترهای مغشوش در بخشی که جریان از محدوده مغشوش به آرام وارد می‌شود، از رابطه ۱۳ و در بخشی که از محدوده آرام به مغشوش وارد شود از رابطه ۱۴ استفاده شد.

$$\nabla k.n = 0, \nabla \varepsilon.n = 0 \quad (13)$$

$$k = 0.005 m^2 s^{-2}, \varepsilon = 0.005 m^2 s^{-3} \quad (14)$$

استقلال نتایج از شبکه‌بندی و اعتبارسنجی

جهت اطمینان حاصل نمودن از مستقل بودن نتایج شبیه‌سازی از شبکه، شبکه‌هایی با دانسیته‌های مختلف بررسی می‌شوند که این عملیات استقلال شبکه‌بندی نام دارد. بدین منظور، شبکه‌هایی با دانسیته‌های مختلف، تحت ارزیابی قرار گرفت تا

در این رابطه R و Q به ترتیب شعاع لوله با واحد m و دبی ورودی به کنتور با واحد m³/h است. مواقعی که رژیم جریان، مغشوش باشد مقادیر k و ε در ورودی همان مقادیر پیش فرض نرم‌افزار است که به ترتیب برابر با ۰/۰۰۵ m²s⁻² و ۰/۰۰۵ m²s⁻³ انتخاب شدند.

• خروجی لوله اصلی:

شرط مرزی خروجی برابر با فشار محیط در نظر گرفته شده است.

$$P = P_0 = 1 atm \quad (9)$$

و پارامترهای مغشوش در محدوده رژیم مغشوش به صورت رابطه ۹ محاسبه می‌شوند.

$$\nabla k = 0, \nabla \varepsilon = 0 \quad (10)$$

• صفحه قرینه:

با توجه به قرینه بودن هندسه و جهت کاهش هزینه محاسباتی از شرط مرزی تقارن استفاده می‌شود. رابطه ۱۱ این شرط را برای سرعت، نرخ جنبشی اغتشاش و نرخ اتلاف انرژی جنبشی نشان می‌دهد. دو شرط مرزی آخر مواقعی در نظر گرفته می‌شود که جریان در محدوده مغشوش باشد.

$$\nabla u.n = 0, \dots, \nabla k.n = 0, \nabla \varepsilon.n = 0 \quad (11)$$

• سطح مشترک لوله اصلی و مسیر کنارگذر:

در بازه ۲/۳ تا ۶ m³/h جریان در لوله اصلی به حالت مغشوش در می‌آید اما جریان به دلیل تقسیم در لوله‌های المان آرام‌ساز جریان و مسیر کنارگذر با

دانسیته شبکه، خطای میانگین بین نتیجه شبیه‌سازی و تئوری کاهش می‌یابد اما در تعداد شبکه ۵۰۲ هزار نسبت به ۶۵۰ هزار کاهش خطایی دیده نمی‌شود که نشان‌دهنده کافی بودن تعداد شبکه ۵۰۲ هزار است. شبکه‌بندی مورد استفاده برای انجام این شبیه‌سازی‌ها در شکل ۴ آورده شده است. در میکروکانال و المان آرام‌ساز از شبکه منظم چهار وجهی و در بقیه هندسه از شبکه شش وجهی استفاده شده است.

بحث و بررسی نتایج

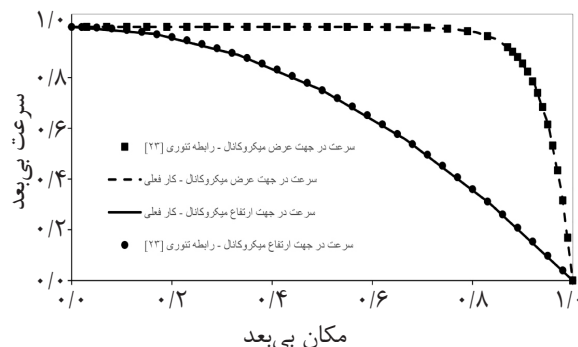
عملکرد سیستم معرفی شده جهت به‌کارگیری جریان سنج‌های میکروترمال در مصارف خانگی با مقادیر مختلف از پارامترهای هندسی بررسی شده است.

شبکه با تعداد مناسب به‌دست آید. در جدول ۴ خطای میانگین نتایج شبیه‌سازی نسبت به رابطه تئوری ارائه‌شده توسط [۲۳] برای چهار شبکه با دانسیته مختلف آورده شده است.

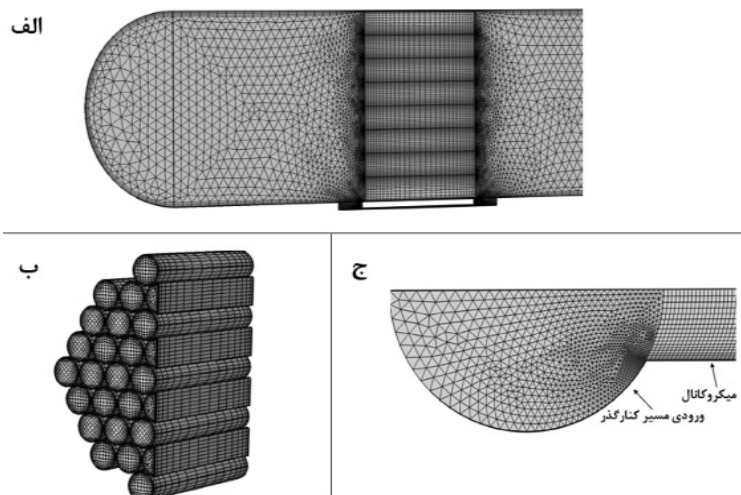
جدول ۴ بررسی استقلال نتایج از شبکه

زمان انجام محاسبات (h)	خطای میانگین (%)	دانسیته شبکه (هزار)
۰/۵	۵	۱۲۰
۰/۹	۳/۵	۳۴۰
۱/۳	۰/۰۵	۵۰۲
۱/۶	۰/۰۵	۶۵۰

مقدار خطای میانگین گزارش‌شده در جدول ۴، میانگین خطای تمام نقاط نشان داده شده در شکل ۳ با داده‌های شبیه‌سازی متناظر است. همان‌طور که نتایج گزارش شده نشان می‌دهد، با افزایش



شکل ۳ اعتبارسنجی پروفایل بی‌بعد سرعت در سطح مقطع میکروکانال



شکل ۴ شبکه‌بندی استفاده شده: (الف) نمای کلی، (ب) المان آرام‌ساز و (ج) ورودی مسیر کنارگذر از نمای پایین

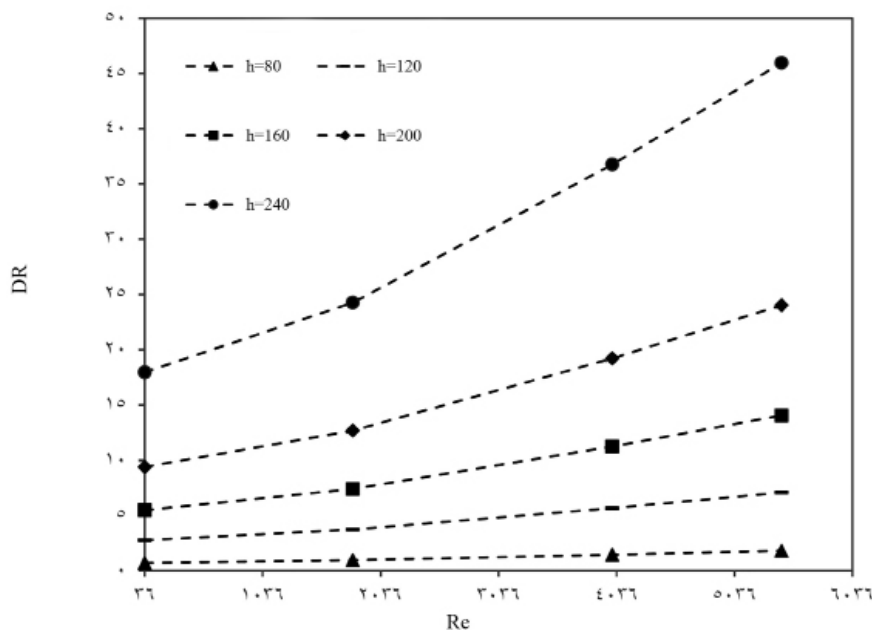
با افزایش سطح مقطع مسیر کنارگذر افت فشار آن کمتر می‌شود و در نتیجه هنگام تقسیم دبی بین مسیر اصلی و مسیر کنارگذر دبی بیشتری در مسیر کنارگذر (میکروکانال) جریان می‌یابد. باید توجه شود که کانال با ارتفاع $80 \mu\text{m}$ باعث عبور جریان بسیار کمی از مسیر کنارگذر می‌شود که با افزایش ارتفاع کانال به $160 \mu\text{m}$ افزایش $7/85$ و $7/73$ برابری در ابتدا و انتهای بازه اندازه‌گیری در دبی عبوری از مسیر کنارگذر مشاهده می‌شود. مقدار این دبی در ارتفاع $160 \mu\text{m}$ تا $1/41 \text{ mL/min}$ می‌رسد در صورتی که این عدد برای ارتفاع 80 و $120 \mu\text{m}$ به ترتیب $0/18 \text{ mL/min}$ و $0/7 \text{ mL/min}$ است. با توجه به کارهای پیشین [۲۴ و ۱۶] هر چه ضخامت میکروکانال مجتمع شده با جریان‌سنج میکروترمال کمتر باشد، حساسیت آن به تغییر دبی بیشتر است اما همان‌طور که مشاهده شد در ارتفاع $80 \mu\text{m}$ جریان قابل قبول برای اندازه‌گیری وارد مسیر کنارگذر نمی‌شود. بنابراین، کوچک‌ترین ارتفاع قابل انتخاب با توجه به مقادیر شبیه‌سازی شده $160 \mu\text{m}$ است.

که عبارت‌اند از: ارتفاع میکروکانال (h)، موقعیت مسیر کنارگذر (c)، چینش دسته لوله و قطر لوله‌های دسته لوله (dt). میزان نسبت تقسیم جریان بین دو مسیر اصلی و کنارگذر^۱ (DR) جهت مقایسه تأثیر ابعاد مختلف پارامترها در نظر گرفته شده است. بررسی‌ها در چهار عدد رینولدز ۳۶، ۱۸۰، ۴۰۰ و 5435 در ورودی انجام شده است که به ترتیب متناظر با کمترین دبی کنتور، انتهای بازه آرام، بین بازه آرام و انتهای بازه اندازه‌گیری و بیشترین دبی کنتور هستند. نسبت تقسیم جریان در رابطه ۱۵ نشان داده شده است. در این رابطه Q و Q_{BP} به ترتیب دبی ورودی به سیستم و دبی ورودی به مسیر کنارگذر بر حسب متر مکعب بر ساعت هستند.

$$DR = \frac{Q_{BP}}{Q} \times 10^6 \quad (15)$$

ارتفاع مسیر کنارگذر (میکروکانال)

تأثیر ارتفاع مسیر کنارگذر (میکروکانال) بر مقدار نسبت تقسیم جریان بین دو مسیر اصلی و کنارگذر در شکل ۵ نشان داده شده است. طبق این نمودار با افزایش ارتفاع کانال دبی بیشتری به مسیر کنارگذر وارد می‌شود. بدیهی است که



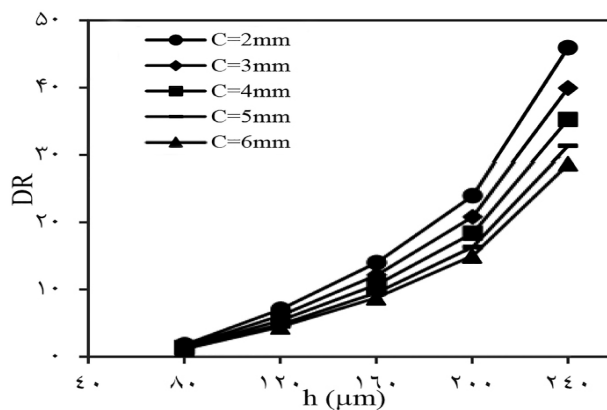
شکل ۵ نسبت تقسیم جریان بین دو مسیر اصلی و کنارگذر بر حسب عدد رینولدز در $C = 2 \text{ mm}$ برای مقادیر مختلف h

باشد دبی بیشتری به مسیر کنارگذر وارد می‌شود. به دلیل این‌که المان آرام‌ساز جریان یک دسته لوله است بنابراین جریان جهت تقسیم شدن بین این دسته لوله با افت فشار مواجه می‌شود. به عبارت دیگر، هر چه C بیشتر باشد، ورودی مسیر کنارگذر تأثیر کمتری از افت فشار ناشی از المان آرام‌ساز می‌پذیرد. همچنین با افزایش C ، طول کانال نیز افزایش می‌یابد که باعث افت فشار بیشتر می‌شود. بنابراین مناسب‌ترین فاصله، نزدیک‌ترین مکان ممکن است که در این کار این مقدار برابر با 2 mm است. شکل ۸ اثر متقابل پارامترهای موقعیت مسیر کنارگذر (C) و ارتفاع کانال (h) بر مقدار نسبت تقسیم جریان بین دو مسیر اصلی و کنارگذر (DR) را نشان می‌دهد. طبق این نمودار در تمامی مقادیر h ، افزایش C باعث کاهش DR می‌شود.

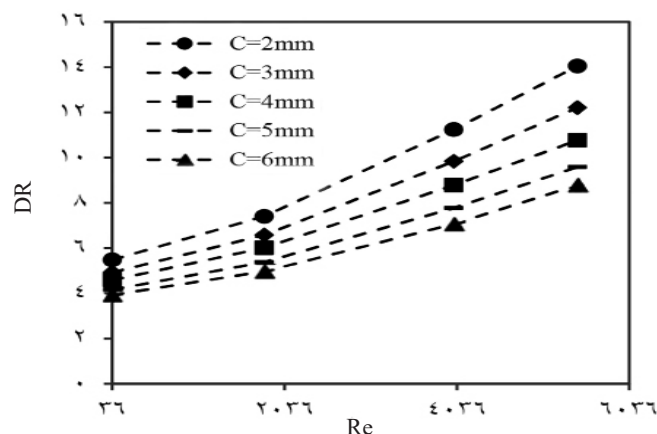
شکل ۶ اثر متقابل ارتفاع کانال (h) و موقعیت کانال نسبت به المان آرام‌ساز جریان (C) بر نسبت تقسیم جریان بین دو مسیر اصلی و کنارگذر (DR) را نشان می‌دهد. در تمام مقادیر C با افزایش h مقدار DR نیز افزایش می‌یابد اما میزان افزایش آن در مقادیر کمتر C اندکی بیشتر است. طبق این نمودار شیب تغییرات دبی ورودی به مسیر کنارگذر به ازای هر میکرومتر در افزایش h از 80 به $160\ \mu\text{m}$ در C های 2 و 6 mm به ترتیب $0/0026$ و $0/0016$ است.

بررسی موقعیت مسیر کنارگذر نسبت به المان آرام‌ساز جریان

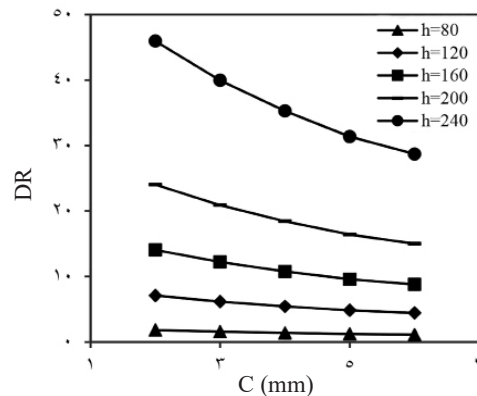
شکل ۷ مقدار نسبت تقسیم جریان بین دو مسیر اصلی و کنارگذر (DR) در فاصله‌های مختلف ورودی و خروجی مسیر کنارگذر از المان آرام‌ساز جریان (C) را نشان می‌دهد. طبق این نمودار هر چه C کمتر



شکل ۶ نسبت تقسیم جریان بین دو مسیر اصلی و کنارگذر برحسب h در $Re = 5435$ برای مقادیر مختلف C



شکل ۷ نسبت تقسیم جریان بین دو مسیر اصلی و کنارگذر برحسب عدد رینولدز در $h = 160\ \mu\text{m}$ برای مقادیر مختلف C



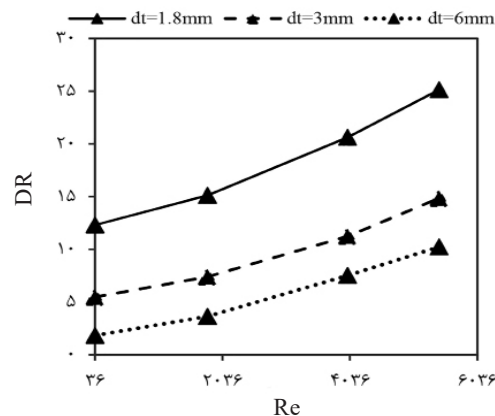
شکل ۸ نسبت تقسیم جریان بین دو مسیر اصلی و کنارگذر برحسب C در $Re=5435$ برای مقادیر مختلف h

طبق این دو شکل هر چقدر قطر لوله‌های دسته لوله کوچک‌تر باشد دبی بیشتری وارد مسیر کنارگذر می‌شود زیرا هر اندازه قطر لوله‌ها کمتر باشد تعداد بیشتری از آن‌ها در بدنه کنتور قرار می‌گیرد. بنابراین، جریان اصلی در لوله‌های بیشتری تقسیم می‌شود و نتیجه آن، افت فشار بیشتر و به‌دنبال آن ورود جریان بیشتر به مسیر کنارگذر است. میزان DR در چینش مربعی با قطر لوله $1/8$ mm کمی بیشتر از چینش مثلثی با همین قطر است اما در قطرهای ۳ و ۶ mm، مقدار DR در چینش مربعی به مقدار جزئی کمتر از چینش مثلثی است زیرا در اطراف دسته لوله‌ها برای قطر $1/8$ mm در چینش مثلثی نسبت به چینش مربعی فضای باز بزرگ‌تری وجود دارد که همین عامل باعث عبور بیشتر جریان از این قسمت می‌شود. همچنین، این فضای باز برای قطرهای ۳ و ۶ mm در چینش مربعی کمی بیشتر از چینش مثلثی است.

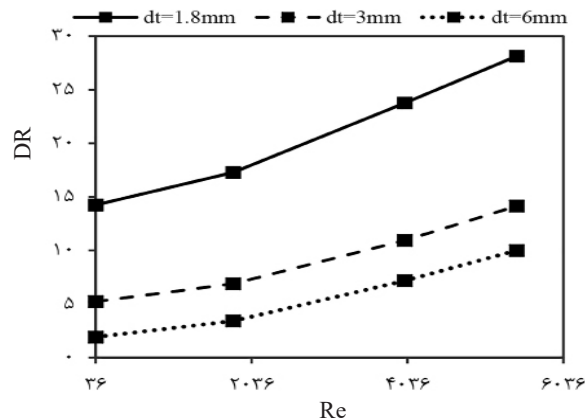
اما همان‌طور که در این نمودار مشاهده می‌شود در مقادیر بیشتر h، تغییر C باعث تغییر بیشتر در دبی ورودی به مسیر کنارگذر می‌شود. شیب تغییرات DR به‌ازای هر میلی‌متر در افزایش C از ۲ به ۴ mm در مقادیر ۸۰ و $240 \mu\text{m}$ ضخامت میکروکانال به ترتیب $0/12$ و $0/53$ است. به این ترتیب طبق نمودارهای شکل ۶ و شکل ۸ تأثیر h بر C بیشتر از تأثیر C بر h است.

بررسی چیدمان لوله‌های المان آرام‌ساز جریان

از دو بخش ۵-۱ و ۵-۲ ارتفاع کانال (h) $160 \mu\text{m}$ و موقعیت مسیر کنارگذر (C) ۲ mm انتخاب شد. حال با این مشخصات به بررسی دو چینش مثلثی و مربعی دسته لوله المان آرام‌ساز جریان پرداخته شده است. در این بخش، سه دسته لوله با سه قطر $1/8$ ، ۳ و ۶ mm شبیه‌سازی شدند و نتایج آن در شکل‌های ۹ و ۱۰ که به ترتیب برای چینش مثلثی و مربعی هستند، مشاهده می‌شوند.



شکل ۹ نسبت تقسیم جریان بین دو مسیر اصلی و کنارگذر برحسب عدد رینولدز در چینش مثلثی برای مقادیر مختلف d_t



شکل ۱۰ نسبت تقسیم جریان بین دو مسیر اصلی و کنارگذر برحسب عدد رینولدز در چینش مربعی برای مقادیر مختلف d_p

نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از بررسی اثر پارامترهای ارتفاع میکروکانال (h)، موقعیت میکروکانال نسبت به المان آرام‌ساز جریان (C)، چینش و قطر لوله‌های المان آرام‌ساز جریان (d_p) بر مشخصه نسبت تقسیم جریان بین دو مسیر اصلی و کنارگذر در سیستم بکارگیری جریان‌سنج میکروترومال در مصارف خانگی می‌تواند در زمینه طراحی این گونه سیستم‌ها، در اختیار مهندسان راهنمایی‌هایی قرار دهد. وجود افت فشارهای متفاوت در المان آرام‌ساز جریان و گردابه‌های جریان در ورودی مسیر کنارگذر، نسبت تقسیم جریان بین دو مسیر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. افزایش عدد رینولدز ورودی به سیستم باعث افزایش نسبت تقسیم جریان می‌شود و میزان تقسیم جریان در هر عدد رینولدز به پارامترهای هندسی وابسته است. ارتفاع میکروکانال بیشترین تأثیر را در نسبت تقسیم جریان دارد و هرچه ارتفاع بیشتر باشد نسبت تقسیم جریان نیز بیشتر است. در کانال با ارتفاع $80 \mu\text{m}$ میزان بسیار ناچیزی جریان از مسیر کنارگذر عبور می‌کند اما با افزایش آن به $160 \mu\text{m}$ افزایش قابل توجهی در دبی عبوری از آن مشاهده می‌شود و از آنجایی که کوچک‌ترین مقدار h طبق کارهای پیشین برای جریان‌سنج‌های میکروترومال مناسب‌تر است، مقادیر بزرگ‌تر h پیشنهاد نمی‌شود. هر چه فاصله ورودی و خروجی

مسیر کنارگذر به المان آرام‌ساز جریان یا همان موقعیت مسیر کنارگذر (C) کمتر باشد، دبی بیشتری وارد مسیر کنارگذر می‌شود. بیشترین تغییری که در نسبت تقسیم جریان با تغییر C از ۶ به 2 mm به وجود می‌آید، برابر است. بنابراین، بهترین مقدار C کمترین مقدار ممکن است که با توجه به ابعاد لوله واسط، مناسب‌ترین مقدار C در کار حاضر برابر با 2 mm است. قطر لوله‌های دسته لوله از آنجایی که باعث تقسیم جریان در مسیر اصلی به جریان‌های کوچک‌تر می‌شود، تأثیر قابل توجهی در افت فشار و وارد شدن جریان به مسیر کنارگذر می‌گذارد و هر چه قطر لوله‌های کمتر شود نسبت تقسیم جریان بیشتر است. از آنجایی که تأثیر تغییرات قطر لوله‌ها بر نسبت تقسیم جریان خطی نیست، بنابراین باید به انتخاب قطر مناسب لوله با توجه به امکانات در دسترس توجه شود. چینش دسته لوله تأثیر چندانی بر DR ندارد و تنها در قطر $1/8 \text{ mm}$ لوله‌ها چینش مربعی کمی بهتر از چینش مثلثی است. در پیکربندی با مقادیر انتخاب شده (چینش مربعی با مشخصات $h=160 \mu\text{m}$ ، $C=2$ و $d_p=1/8 \text{ mm}$) تا 220% نسبت به اکثر پیکربندی‌های دیگر که در کار حاضر بررسی شده است، دبی بیشتری وارد مسیر کنارگذر می‌شود. در صورتی که اگر h بیشتر باشد این مقدار بیشتر نیز می‌شود اما طبق کارهای پیشین حساسیت جریان‌سنج کاهش می‌یابد که مطلوب نیست.

علائم و نشانه‌ها

v : سرعت سیال در جهت y (m/s)

C : فاصله ورودی و خروجی مسیر کنارگذر از المان

آرام‌ساز جریان (m)

D : قطر لوله ورودی به سیستم طراحی شده (m)

DR : نسبت تقسیم جریان بین مسیر اصلی و کنارگذر

d_i : قطر لوله‌های دسته لوله المان آرام‌ساز جریان (m)

h : ارتفاع میکروکانال (m)

P : فشار سیال (Pa)

Q : دبی کل ورودی به کنتور (m³/s)

Q_{BP} : دبی ورودی به مسیر کنارگذر (m³/s)

Re : عدد بی بعد رینولدز

t : زمان (s)

U_0 : سرعت متوسط گاز ورودی به سیستم (m/s)

w : سرعت سیال در جهت z (m/s)

u : سرعت سیال در جهت x (m/s)

حروف یونانی

ν : نرخ تلفات به‌واسطه آشفتگی (m²/s³)

μ : ویسکوزیته دینامیکی (Pa.s)

μ' : ویسکوزیته اغتشاشی (Pa.s)

ρ : چگالی سیال (kg/m³)

k : عدد پرانتل برای انرژی جنبشی اغتشاشی

k' : عدد پرانتل برای نرخ تلفات اغتشاشی

ν' : ویسکوزیته سینماتیکی (m²/s)

تشکر و قدردانی

از مدیریت آزمایشگاه تحقیقاتی CFD دانشکده مهندسی شیمی دانشگاه علم و صنعت ایران و شرکت گاز استان تهران به‌واسطه حمایت مالی از این تحقیق، تشکر و قدردانی می‌شود.

مراجع

- [1]. Miciuła I, Stępień P (2019) Analysis of the Global Market of Energy Resources. Springer. 85-96.
- [۲]. گروه ترازنامه هیدروکربوری موسسه مطالعات بین‌المللی انرژی (۱۳۹۵) ترازنامه هیدروکربوری کشور سال ۱۳۹۳، چاپ اول، هزاره سوم اندیشه، ۳۸۶-۳۹۹.
- [3]. TMR Group (2018), Gas Meters Market: Global Industry Analysis Size - Share - Growth - Trends and Forecast 2018–2026, Transparency Market Research (TMR) Pvt. Ltd. 27-30.
- [4]. Massah J, Mohammadifar H, Khazaei J (2010) Consideration of effects of ambient temperature on measuring accuracy of diaphragm gas meters. Romanian Techn. Sci. Academy. 16.1: 70-75.
- [5]. Li X, Deng X, Zhang S, Zhan J, Wu L (2019) Metrological performance of diaphragm gas meters with different use age, The Journal of Engineering, 23: 8991-8994.
- [6]. Tonković Z, Fekete D, Raos P (2016) The effect of measurement error of the gas meter to the calculation of gas consumption, Tehnički vjesnik 23, 5: 1511-1516.
- [7]. Fadaei M, Ameli F, Hashemabadi S H (2019) Experimental study and CFD simulation of two-phase flow measurement using orifice flow meter, Petroleum Research, 108: 85-96.
- [۸]. رستمی ا. و هاشم‌آبادی س. ح. (۲۰۱۳) تأثیر پارامترهای عملیاتی بر روی دقت جریان‌سنج توربینی با استفاده از شبیه‌سازی CFD، پژوهش نفت، ۷۱، ۲۲: صفحات ۹۲-۱۰۳.
- [9]. Ejeian F, Azadi S, Razmjou A, Orooji Y, Kottapalli A, Warkiani M E, Asadnia M (2019) Design and applications of MEMS flow sensors: A review, Sensors and Actuators A: Physical, 295: 483-502.
- [10]. Lee D, Kim J, Park Y, Lee K H, Kim C, Kwon O, Kim S, Lee S R (2020) Sensitive and reliable thermal micro-flow sensor for a drug infusion system, Sensors and Actuators A: Physical, 112033.
- [11]. Mojarab A, Kamali R (2020) Design, optimization and numerical simulation of a MicroFlow sensor in the realistic model of human aorta, Flow Measurement and Instrumentation, 74: 101791.
- [12]. Kuo J T, Yu L, Meng E (2012) Micromachined thermal flow sensors—A review, Micromachines, 3, 3: 550-573.
- [13]. Wu C H, Kang D, Chen P H, Tai Y C (2016) MEMS thermal flow sensors, Sensors and Actuators A: Phys-

ical, 241: 135-144.

[14]. Farsad S, Ardekani M A, Farhani F (2019) Experimental Investigation on negative values of yaw sensitivity coefficient for hot wire anemometer sensor in two-dimensional flow measurement, *Modares Mechanical Engineering*, 19, 5: 1275-1282,

[15]. Yarali M, Khanna S K (2014) Microfabrication of a variable range and multi-directionally sensitive thermal flow sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, 220: 159-167.

[16]. Xue N, Yan W (2012) A silicon-glass-based microfabricated wide range thermal distribution gas flow meter. *Sensors and Actuators A: Physical*, 173, 1: 145-151.

[17]. Sun J, Cui D, Zhang L, Chen X, Cai H, Li H (2013) Fabrication and characterization of a double-heater based MEMS thermal flow sensor, *Sensors and Actuators A: Physical*, 193: 25-29.

[18]. Etxebarria J, Berganzo J, Elizalde J, Llamazares G, Fernández L J, Ezkerra A (2016) Low cost polymeric on-chip flow sensor with nanoliter resolution. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 235: 188-196.

[19]. Farzaneh-Gord M, Parvizi S, Arabkoohsar A, Machado L, Koury R (2015) Potential use of capillary tube thermal mass flow meters to measure residential natural gas consumption, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 22: 540-550.

[20]. Parvizi S, Arabkoohsar A, Farzaneh-Gord M (2016) Natural gas compositions variation effect on capillary tube thermal mass flow meter performance, *Flow Measurement and Instrumentation*, 50: 229-236.

[21]. Cascetta F, Vigo P (1994) The future domestic gas meter: Review of current developments, *Measurement*, 13, 2: 129-145.

[22]. Frattolillo A, Massarotti N (2002) Flow conditioners efficiency a comparison based on numerical approach, *Flow Measurement and Instrumentation*, 13, 1: 1-11.

[23]. Holmes D, Vermeulen J (1968) Velocity profiles in ducts with rectangular cross sections *Chemical Engineering Science*, 23, 7: 717-722.

[24]. Rasmussen A, Mavriplis C, Zaghoul M, Mikulchenko O, Mayaram K, (2001) Simulation and optimization of a microfluidic flow sensor, *Sensors and Actuators A: Physical*, 88, 2.: 121-132.

different diameters of tubes(d_t), different distances of inlet and outlet location of the bypass relative to the laminar flow element (C) and microchannel thickness (h) on the flow division ratio between the bypass and main paths (DR). Investigation were performed at four Reynolds numbers 36, 1800, 4000 and 5435 at the entrance.

The Navier-Stokes and continuity equations have been used to investigate the hydrodynamics of the fluid in the main pipe and the bypass path. The problem is divided into two parts according to the equations used for modeling and simulation. The first part is related to the flow rate of 0.04 to 2.3 m^3/h , where the flow regime is laminar in all parts of the system. The second part is related to the flow rate of 2.3 to 6 m^3/h , where the flow regime in the main pipe is turbulent and in the laminar flow element and microchannel is laminar. The equations for the laminar and turbulent regime are solved simultaneously in the second part of the modeling.

Results and Discussion

The effect of bypass (microchannel) thickness (h), bypass position (C) and triangular and square arrangement of the tubes in tube bundle on the amount of flow division ratio between the main path and bypass (DR) is shown in Figures 1 to 4, respectively. According to Figure 1, due to the pressure drop in the cross-sectional area of the microchannel, by increasing the height of the microchannel, the inlet flow to the microchannel also increases. The effect of this parameter is greater in larger values. According to Figure 2, the lower the C is, the higher the flow rate into the bypass is. Because the laminar flow element consists of a bunch of tubes, the flow have to be divided between these tubes that cause pressure drop. In other words, the higher the C is, the less the inlet flow of the bypass is affected by the pressure drop due to the laminar flow element.

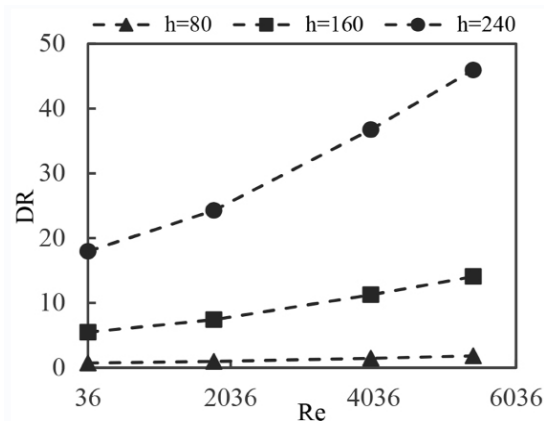


Fig. 1 Flow division ratio between main path and bypass in terms of Reynolds number in $C = 2mm$ for different values of h

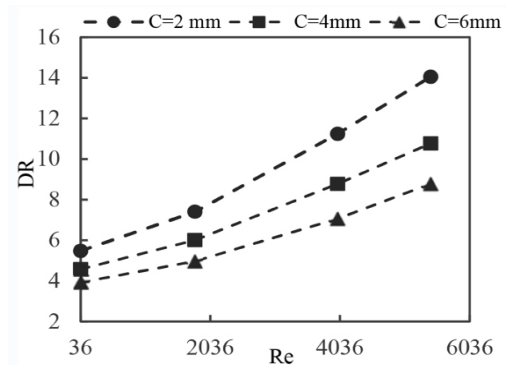


Fig. 2 Flow division ratio between main path and bypass in terms of Reynolds number in $h = 160 \mu m$ for different values of C .

According to Figures 3 and 4, the smaller the diameter of pipes is, the more flow enters the bypass. Because more pipes are placed in the tube bundle with smaller diameter, so the main stream is divided into more tubes that causes more pressure drop.

Fig. 3 Flow division ratio between main path and bypass in terms of Reynolds number in triangular arrangement for different values of d_t

Fig. 4 Flow division ratio between main path and bypass in terms of Reynolds number in square arrangement for different values of d_t

Conclusions

The different values of pressure drops in the laminar flow element and the eddy currents at the inlet of the bypass affect the flow distribution between the two paths. The tube diameter in the tube bundle has a significant effect on the pressure drop and the dividing ratio (DR), because it divides the flow into smaller streams. The other effective parameter on DR is the Reynolds number which has a direct relationship with DR. Also, the amount of DR at each Reynolds number depends on the geometric parameters. The height of the microchannel has the greatest effect on the DR. The higher the height is, the higher the DR is. In contrast, the higher the inlet and outlet distance of the bypass relative to the laminar flow element (C) is, the less flow enters the bypass.

References

1. Miciuła I, Stępień P (2019) Analysis of the Global Market of Energy Resources, in *Eurasian Economic Perspectives*, Springer, 85-96.
2. TMR Group (2018) *Gas Meters Market: Global Industry Analysis Size - Share - Growth - Trends and Forecast 2018–2026*, Transparency Market Research (TMR) Pvt. Ltd.
3. Massah J, Mohammadifar H, Khazaei J (2010), Consideration of effects of ambient temperature on measuring accuracy of diaphragm gas meters, *Romanian Techn. Sci. Academy*, 16, 1: 70-75.
4. Li X, Deng X., Zhang S, Zhan J, Wu L (2019), Metrological performance of diaphragm gas meters with different use age, *The Journal of Engineering*, 23: 8991-8994.
5. Tonković Z, Fekete D, Raos P (2016) The effect of measurement error of the gas meter to the calculation of gas consumption, *Tehnički vjesnik*, 23, 5: 1511-1516.
6. Fadaei M, Ameli F, Hashemabadi SH (2019), Experimental Study and CFD Simulation of Two-phase Flow Measurement Using Orifice Flow Meter, *PETROLEUM RESEARCH*, 108: pp. 85-96.
7. Roštami A, Hashemabadi SH (2013) The effect of operating parameters on the accuracy of a turbine flowmeter using simulation, *Petroleum Research*, 71: 92-103.
8. Kuo JT, Yu L, Meng E (2012) Micromachined thermal flow sensors—A review, *Micromachines*, 3, 3: 550-573.
9. Wu CH, Kang D, Chen PH, Tai YC (2016) MEMS thermal flow sensors, *Sensors and Actuators A: Physical*, 241: 135-144.
10. Farsad S, Ardekani M A, Farhani F (2019) Experimental Investigation on Negative Values of Yaw Sensitivity Coefficient for Hot Wire Anemometer Sensor in Two-dimensional Flow Measurement, *Modares Mechanical Engineering*, 19, 5: 1275-1282.
11. Etxebarria J, Berganzo J, Elizalde J, Llamazares G., Fernández L.J., Ezkerra A. (2016), Low cost polymeric on-chip flow sensor with nanoliter resolution, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 235: pp. 188-196.