



افزایش انتقال حرارت در یک میکروکانال با استفاده از یک مولد گردابه پیزوالکتریک مرتعش مریم کشاورز^۱، سید احسان حبیبی^{۲*}، یاسر امینی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران
^۲ استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۹؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۰/۰۶؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۷

چکیده

یافتن راهکاری برای افزایش نرخ انتقال حرارت در چاه‌ها و مبدل‌های حرارتی از مسایل بسیار پراهمیت در صنایع بشمار می‌آید. از این رو تحقیقات متعددی در راستای بهبود عملکرد این سیستم‌ها انجام گرفته است. در تحقیق حاضر مساله افزایش نرخ انتقال حرارت در یک میکرو کانال مستطیلی حاوی تعدادی مولد گردابه مورد بررسی قرار گرفته است. مولدهای گردابه‌ای در نظر گرفته شده شامل پینه‌ای مکعبی هستند که دارای تیغه‌هایی منعطف مجهز به وصله‌های پیزوالکتریک می‌باشند. این تیغه‌ها با عبور جریان تحت اندرکنش سیال-سازه قرار گرفته و مرتعش می‌شوند. به منظور اطمینان از برقراری شرایط جریان آرام، عدد رینولدز برحسب قطر هیدرولیکی کانال برابر با ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است. اثرات هیدرولیکی-حرارتی تعداد مولدهای گردابه، سفتی تیغه‌ها در تحریک وصله‌های پیزوالکتریک مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان دهنده این واقعیت هستند که مجهز شدن کانال به مولدهای پیزوالکتریک اثر قابل توجهی در افزایش نرخ انتقال حرارت دارد و می‌توان با افزایش ۳۳ درصدی توان مورد نیاز پمپی، به میزان ۱۴۰ درصد نرخ انتقال حرارت را نسبت به کانال بدون مبدل گردابه، بهبود بخشید.

کلمات کلیدی: اندرکنش سیال-سازه؛ افزایش نرخ انتقال حرارت؛ مولد گردابه؛ تیغه منعطف؛ بازده هیدرولیکی-حرارتی.

Heat transfer enhancement in a microchannel using active vibrating piezoelectric vortex generator

M. Keshavarz¹, S. E. Habibi^{2*}, Y. Amini²

¹ MSc. Student, Mech. Eng., Kalije Fars Univ., Bushehr, Iran

² Assist. Prof., Mech. Eng., Kalije Fars Univ., Bushehr, Iran

Abstract

Heat transfer processes are widely used in many industrial applications, therefore many studies have been conducted in this field. so in this research, the effect of the active vibrations of a piezoelectric vortex generator on the displacement heat transfer rate in a microchannel is investigated. The assumed vortex generators consist of square pins having a flexible splitter plates on their lee side. These plates will be deformed under fluid structure interactions. The Reynolds number, based on the channel's hydraulic diameter, is set to 1000 to ensure laminar flow. The heat transfer performance, the hydrodynamic friction factor and the overall hydrothermal efficiency for different number of VGs and splitter's flexural rigidity are investigated. The results showed that softer splitters provide better heat transfer capability and the higher hydrothermal performance. The results also indicated that, by selecting proper configuration, in the expense of 33% decrease in total hydrothermal efficiency with respect to clean channel, 140% increase in the rejected heat, compared to clean channel, can be achieved.

Keywords: Fluid structure interaction (FSI); Heat transfer enhancement; vortex generator; Flexible splitter; overall hydrothermal performance.

۱- مقدمه

دفع حرارت تولیدی در تجهیزات مکانیکی و الکتریکی، از جمله مهمترین چالش‌های پیش روی تجهیزات صنعتی است. اگرچه هر سه نوع مکانیزم انتقال حرارت در کاربردهای عملی اهمیت دارد، اما بیشترین سهم در این میان را انتقال حرارت همرفتی بر عهده دارد [۱]. از این رو شیوه‌های افزایش نرخ انتقال حرارت همرفتی از جمله مسائلی است که بصورت ویژه‌ای مورد توجه محققان قرار گرفته است. زمان انجام اولین تحقیقات این حوزه به حدود ۱۵۰ سال پیش برمی‌گردد [۲]. این تحقیقات اولیه که بیشتر شامل مشاهدات تجربی بود، در اواسط قرن بیستم و با گسترش و در دسترس بودن امکانات محاسباتی سرعت یافت [۳]. در مطالعات قبلی، روش‌های متعددی برای افزایش انتقال حرارت همرفتی مورد استفاده قرار گرفته است. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های شامل افزایش سطوح تماس بین فازها به عنوان مثال با استفاده از پوشش دهی سطوح [۴، ۵]، روش‌های شامل تغییر خواص سیال کاری با استفاده از افزونه‌های نانو مقیاس [۶] و روش‌های افزایش دهنده اختلاط جریان [۱، ۴] اشاره نمود. از این میان، به کارگیری مولدهای گردابه جهت ایجاد اختلاط در سیال، به دلیل سادگی در استفاده و نیز هزینه نسبی کمتر، برتری قابل توجهی نسبت به سایر روش‌ها دارند [۷] و از این رو موضوع تحقیقات متعددی قرار گرفته‌اند [۸-۱۰]. روش‌های ایجاد اختلاط را می‌توان به دو گروه روش‌های فعال و غیرفعال تقسیم نمود. در روش‌های غیر فعال، اختلاط در جریان سیال با استفاده از انرژی سیال و بدون نیاز به منبع انرژی بیرونی ایجاد می‌شود. این درحالی است که روش‌های ایجاد اختلاط فعال برای تولید گردابه‌ها متکی به تامین انرژی مورد نیاز از بیرون هستند. با توجه به میزان سفتی مولدهای گردابه مورد استفاده، با توجه به میزان نیروهای اعمالی از سیال، این مولدها می‌توانند به صورت صلب و یا منعطف رفتار کنند. مولدهای گردابه منعطف در اثر برهمکنش با سیال دچار تغییر شکل شده و با توجه به مشخصات جریان سیال و سفتی مولد گردابه این تغییر شکل می‌تواند بصورت حرکتی ارتعاشی یا بصورت تغییر شکل ایستا باشد. نشان داده شده است که مولدهای گردابه‌ای مرتعش نسبت به مولدهای ایستا و همچنین مولدهای فعال

نسبت به مولدهای غیر فعال کارایی حرارتی بهتری دارند [۸].
[۱۱، ۱۲].

استفاده از شبیه سازی‌های عددی همزمان با رشد توانایی محاسباتی کامپیوترها گسترش قابل توجهی یافته است. اولین تلاش‌ها در زمینه شبیه سازی عددی فرایند انتقال حرارت همرفتی اجباری در سال ۱۹۷۷ انجام گرفت [۱۳]. در این تحقیق کارایی حرارتی و توان هیدرولیکی مورد نیاز در یک مبدل گرمایی حاوی مولدهای گردابه صلب که بصورت تناوبی در جریان قرار گرفته بودند مورد بررسی قرار گرفت. پس از آن نیز تعداد قابل توجهی از تحقیقات انجام شده بر بررسی اثرات هیدرولیکی- حرارتی مولدهای گردابه صلب متمرکز بوده اند [۹، ۱۴، ۱۵]. در این تحقیقات اثرات شکل، اندازه، زاویه حمله و فاصله بین بالچه‌های صلب در افزایش نرخ انتقال حرارت مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نتایج حاصله حاکی از این واقعیت هستند که کارایی بالچه‌ها در جریان آرام بیشتر است و همچنین برای فاصله بین بالچه‌ها یک اندازه بهینه وجود دارد [۱۵]. دادوند و همکاران تاثیر موانع مستطیلی و دایره‌ای و سفتی^۱ تیغه متصل شده به آنها را بر روی کارایی حرارتی- هیدرولیکی مورد بررسی قرار دادند [۱۶]. چنین مشاهده شده است که تیغه‌های انعطاف پذیر کارایی حرارتی و هیدرولیکی بهتری نسبت به تیغه‌های صلب دارند. به بیان دقیقتر، چنین مشاهده شد که تیغه‌های منعطف دارای ۴۲ درصد کارایی حرارتی بهتر و ۴۲/۳۲ درصد اتلاف هیدرولیکی کمتر نسبت به تیغه‌های ثابت دارند. تحقیقات مشابهی که بر روی بررسی موانع استوانه‌ای در ترکیب با تیغه‌های صلب و منعطف انجام گرفت [۱۷]، نشان دادند که میزان عدد ناسلت و همچنین کارایی حرارتی مجموعه بصورت مستقیم با میزان نرمی تیغه‌ها مرتبط است و می‌تواند به افزایش ۱۱/۰۷ درصدی انتقال حرارت منجر شود.

یکی از چالش‌های مهم توسعه تجهیزات الکترونیکی دفع حرارت تولیدی از این تجهیزات است. نشان داده شده است که افزایش یک درجه‌ای درجه حرارت می‌تواند عمر این قطعات را به نصف کاهش دهد [۱۸]. راهکار معمول برای افزایش نرخ انتقال حرارت در این تجهیزات، اضافه نمودن پره است. علاوه بر این مشاهده شده است که اضافه نمودن موانعی بر سر راه جریان اگرچه تا حدودی میزان اتلاف فشار در مجموعه را

¹ Stiffness

اثرات موده‌های مختلف ارتعاشی مولد پیزوالکتریک بر روی کارایی هیدرولیکی و حرارتی مولد در [۲۸] بررسی شد و محققین به این نتیجه رسیدند که موده‌های مختلف ارتعاشی بر روی میزان حرارت منتقل شده و همچنین بر روی اتلاف مکانیکی تحمیلی به شدت تاثیرگذار است.

همراه با پیشرفت در علوم و توسعه آن در حوزه فناوری‌های مرتبط، امکان ایجاد کاربردهای عملی جدیدی فراهم می‌آید. با استفاده از تکنیک‌های یادگیری ماشین، در سال‌های اخیر محققین سعی کرده‌اند بتوانند رفتار مولدهای گردابه‌ای یا مولدهای انرژی پیزوالکتریک را پیش‌بینی نمایند [۲۹ و ۳۰]. در کنار این تکنولوژی‌ها، تلاش‌های مداومی نیز برای بهبود عملکرد نتایج تکنولوژی‌های پیشین نیز بصورت مداوم در دست انجام است [۳۱ و ۳۲]. در [۳۱] با انتخاب مولدهای گردابه‌ای منحنی شکل با استفاده از مشاهدات تجربی و همچنین شبیه سازی‌های عددی نشان داده شده است که می‌توان تا ۱٫۹۸ برابر عملکرد حرارتی را نسبت به کانال بدون مولد ارتقا داد. همچنین در [۳۲] مزیت استفاده از مولدهای گردابه در بهبود عملکرد مولدهای انرژی پیزوالکتریک مورد تحقیق قرار گرفته است.

با توجه به تحقیقات اشاره شده چنین برمی‌آید که مساله توانایی مولد گردابه پیزوالکتریک در افزایش نرخ انتقال حرارت در کانال حاوی سیال متحرک به رغم کاربردهای فراوان آن، توجه کمی را به خود جلب کرده است. به دلیل اثرات متقابل فازهای سیال و جامد، تغییرات کوچک در هندسه مسایل مفروض می‌تواند تغییرات زیادی را در کارایی حرارتی کانال ایجاد نماید. تحقیق پیش رو بنا دارد با ترکیب قابلیت‌های مولد گردابه فعال و غیر فعال، برای نخستین بار کارایی هیدرولیکی - حرارتی مولدهای گردابه‌ای منعطف با عملگرهای پیزوالکتریک که به قسمت پشتی پینهای مکعبی ثابت متصل شده‌اند را درون یک کانال مستطیلی با جریان آرام مورد بررسی قرار دهد.

۲- تشریح مساله

مساله مورد بررسی شامل یک میکرو کانال حاوی جریان سیال است. به منظور ازدیاد نرخ انتقال حرارت، کانال مجهز به تعدادی مولد گردابه‌ای شده است. مولدهای گردابه‌ای شامل

افزایش می‌دهد، اما با ایجاد اختلاط بیشتر سبب افزایش قابل توجه نرخ انتقال حرارت و بازده حرارتی- هیدرولیکی سیستم می‌شود [۱۹]. تحقیقات نشان داده است که اضافه نمودن صفحات جدا کننده در سمت پایین^۱ این موانع با تغییر خطوط جریان سیال، موجب کاهش قابل توجه اتلاف هیدرولیکی در سیستم می‌شود [۲۰].

به دلیل کارایی بیشتر مولدهای گردابه‌ای فعال نسبت به مولدهای غیر فعال [۸] تلاش‌های متعددی در راستای بررسی کارایی مولدهای گردابه‌ای فعال صورت پذیرفته است. از ساده ترین و کاراترین روش‌های تهیه مولدهای فعال بهره گیری از مواد پیزوالکتریک است. مولدهای گردابه‌ای پیزوالکتریک با بهره گیری از خاصیت معکوس پیزوالکتریک و با اعمال اختلاف پتانسیل مناسب، باعث ایجاد اختلاط بیشتر در محیط سیال می‌گردند. توانایی و سادگی این مولدهای گردابه‌ای پیزوالکتریک باعث شده است که محققین زیادی تحقیقات خود را بر روی بررسی کارایی آنها متمرکز کنند [۲۱-۲۸]. ترکیب روش‌های فعال و غیر فعال افزایش انتقال حرارت در مورد یک چاه حرارتی در [۲۱] مورد بررسی قرار گرفت و چنین نشان داده شد که مولد فعال پیزوالکتریکی می‌تواند تا ۲۲ درصد باعث افزایش نرخ انتقال حرارت شود. کارایی یک پره مرتعش کننده پیزوالکتریک در یک کانال مستطیلی در [۲۲] مورد بررسی قرار گرفت. چنین مشاهده شد که مرتعش کننده پیزوالکتریک در سرعت‌های مختلف سیال، کارایی متفاوتی دارد و در بعضی از سرعت‌ها، جریان سیال باعث میرا شدن ارتعاشات مولد می‌گردد. کارایی همزمان چندین مولد پیزوالکتریک در انتقال حرارت طبیعی نیز مورد بررسی قرار گرفته است [۲۳، ۲۴]. در مرجع [۲۵] اثرات قرارگیری یک مولد پیزوالکتریک در جریان مغشوش درون یک کانال مستطیلی به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. محققین با اضافه نمودن یک پره منعطف دیگر به انتهای پره مجهز به تکه‌های پیزوالکتریک توانستند کارایی مولد گردابه پیزوالکتریک را ارتقا ببخشند. پیچیدگی‌های ناشی از برهمکنش متقابل جریان سیال و حرکت جسم جامد باعث می‌شود که برای هر مساله‌ای بازه کارکردی بهینه مشخصی وجود داشته باشد [۲۶]. حتی در پاره‌ای از حالات مشاهده شد که افزایش توان مصرفی قطعه پیزوالکتریک باعث کاهش میزان انتقال حرارت می‌شود [۲۶].

^۱ Lee side

شده‌اند. مقدر عددی پارامترها و مشخصات استفاده شده در مساله در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱- پارامترها و مشخصات استفاده شده در مساله

واحد	مقدار	نماد	پارامتر
-	۱۰۰۰	Re	عدد رینولدز
$Pa.s$	۱	μ	ویسکوزیته دینامیکی سیال
Kg/m^3	۱۰۰۰	ρ_f	چگالی سیال
$W/(m.K)$	۰/۶	k_f	ضریب هدایتی سیال
m/s	۱/۲۱۹۵	U_{in}	سرعت ورودی سیال
$J/(kg.K)$	۴/۲	C_p	ظرفیت گرمایی ویژه سیال
-	۰/۴	θ	ضریب پواسون
mm	۴۱۰	H	عرض میکروکانال
mm	۷۷۹۰	L	طول میکروکانال
mm	۱۰۰	a	طول تکیه‌گاه مربعی
Kg/m^3	۵۰۰۰	ρ_s	چگالی میله جامد الاستیک
m	۰/۳۵	L_p	طول میله جامد الاستیک
m	۰/۰۱	h_p	ضخامت میله جامد الاستیک
m	۰/۰۷	L_{pi}	طول قطعه پیزوالکتریک
m	۰/۰۰۵	hh	ضخامت قطعه پیزوالکتریک

۴- معادلات حاکم

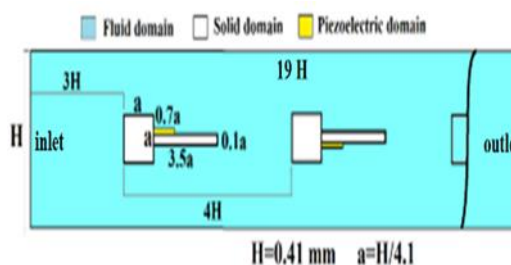
مساله مورد بررسی از جمله مسایل ترکیبی است که چندین حوزه مطالعاتی را در بر می‌گیرد. در زیر به معادلات میدانی حاکم بر این حوزه‌ها به همراه شرایط مرزی آنها اشاره خواهد شد

۴-۱- معادلات حاکم بر محیط سیال

با رعایت کردن قاعده جمع اندیسی معادلات پیوستگی و پایستگی تکانه خطی برای سیال نیوتنی تراکم ناپذیر در جریان آرام را می‌توان بصورت زیر بیان نمود. توجه شود در شرایط مساله حاضر به دلیل عدم وجود سطح آزاد می‌توان از اثرات شتاب گرانش بر روی حرکت سیال صرف‌نظر نمود [۳۳].

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

بین‌های مکعبی هستند که در وسط کانال نصب شده‌اند. به منظور کاهش اتلاف هیدرولیکی ایجاد شده در نتیجه قرار دادن مولدهای گردابه‌ای در مسیر جریان، صفحات منعطف متصل به یک وصله پیزوالکتریک مطابق شکل ۱ به بین‌ها متصل شده است. برای در نظر گرفتن کانال دوبعدی چنین فرض شده است که مولدهای گردابه‌ای تمام عمق کانال را دربر گرفته‌اند؛ بنابراین جریانی در جهت عمود بر مقطع نشان داده شده در شکل ۱ ایجاد نمی‌گردد. در یک مساله واقعی با قراردادن چندین میکروکانال در کنار هم می‌توان به ظرفیت‌های قابل قبولی برای چاه‌های حرارتی بزرگ دست یافت.



شکل ۱- شماتیک مساله به همراه ابعاد در نظر گرفته شده

۳- تشریح مساله

مساله مورد بررسی شامل یک مساله اندرکنش سیال- جامد در حضور تعاملات حرارتی در محیط سیال و نیز وجود عملگرهای پیزوالکتریک در محیط جامد است. محیط‌های سیال و جامد در نظر گرفته شده به ترتیب تراکم ناپذیر و الاستیک خطی در نظر گرفته شده‌اند. ماده پیزوالکتریک مورد استفاده از جنس PZT-5H در نظر گرفته شده است. ورودی سیال بصورت کاملاً توسعه یافته با توزیع سهموی با میانگین U_{in} در نظر گرفته شده است. در تمامی مرزهای مشترک بین سیال و جامد شرط عدم لغزش اعمال شده است. به منظور برقراری شرایط جریان آرام، عدد رینولدز براساس قطر هیدرولیکی کانال برابر با ۱۰۰۰ در نظر گرفته شده است. همچنین برای اطمینان از ایجاد گردابه‌های سیال در پایین دست مولد، عدد رینولدز برحسب ابعاد بین مکعبی برابر ۲۴۴ در نظر گرفته شده است. در دیواره‌های کانال شروط دمایی دما ثابت با دمای T_w در نظر گرفته شده است. مرزهای مولدهای گردابه بصورت عایق حرارتی و ورودی سیال در دمای T_{in} فرض

۳-۴- معادلات حاکم بر محیط پیزوالکتریک

رفتار پیزوالکتریک یک رفتار الکتریکی- مکانیکی است. از این رو معادلات حاکم بر این رفتار، پاسخ سیستم به عنوان یک محیط جامد و به عنوان یک محیط دی‌الکتریک را در بر می‌گیرد. اگرچه در حالت کلی تحلیل این رفتار ماهیت دینامیکی دارد، اما فرض حالت شبه ایستایی برای میدان الکتریکی با دقت خوبی یک فرض منطبق بر واقعیت است [۳۴]. از این رو می‌توان از بررسی تغییرات میدان الکتریکی با زمان و تحلیل تعاملات مغناطیسی در محیط صرفنظر نمود. در این حالت در کنار الزام برقراری معادله حرکت، معادلات گوس و ماکسول نیز باید بر حوزه محیط پیزوالکتریک بصورت زیر ارضا شوند

$$T_{sij,j} + f_i = \sigma \ddot{u}_i \quad (۸)$$

$$D_{i,i} - q = 0 \quad (۹)$$

$$E_i = -\varphi_{,i} \quad (۱۰)$$

که در آن D_i ، φ و E_i نشان‌دهنده مولفه‌های جابجایی الکتریکی، میدان پتانسیل الکتریکی و مولفه‌های بردار میدان الکتریکی است. در کنار معادلات فوق باید روابط بنیانی زیر نیز برقرار باشند

$$T_{sij} = c_{ijkl} S_{kl} - e_{kij} E_k \quad (۱۱)$$

$$D_k = e_{kij} S_{ij} + \varepsilon_{ki} E_i \quad (۱۲)$$

که در این روابط، S_{ij} ، ε_{ki} و e_{kij} به ترتیب مولفه‌های کرنش، ثوابت دی‌الکتریک و پیزوالکتریک ماده هستند. این ثوابت باید با انجام آزمایشات لازم برای هر ماده مفروض بدست آیند.

برای حل این سیستم معادلات به همراه شرایط مرزی ذکر شده می‌توان از روش المان محدود استفاده نمود. بر اساس این روش، محیط محاسباتی مساله گسسته سازی می‌گردد. پس از آن توزیع مناسبی برای متغیرهای میدانی مساله در هرکدام از المان‌های در نظر گرفته می‌شود. سپس معادلات حاکم در هرکدام از المان‌ها با هم بصورت خطی سرهم‌بندی شده و معادلات دیفرانسیل معمولی حاصل با یکی از روش‌های استاندارد عددی حل می‌گردند.

$$\rho_f \left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \mu_f \frac{\partial v_i}{\partial x_j \partial x_j}, \quad i, j = 1, 2 \quad (۲)$$

که در آن P و ρ_f به ترتیب نشان دهنده مولفه‌های سرعت، فشار و چگالی و سیال می‌باشند. μ_f نیز ویسکازیت سیال است. همچنین معادله پایستگی انرژی برای یک جریان یک سیال نیوتنی تراکم‌ناپذیر بصورت زیر است

$$\rho_f C_p \left(\frac{\partial T_f}{\partial t} + v_i \frac{\partial T_f}{\partial x_i} \right) = k \frac{\partial^2 T_f}{\partial x_i \partial x_i} \quad (۳)$$

که در این رابطه T_f ، C_p و k به ترتیب دمای محیط سیال، ضریب گرمای ویژه و ضریب هدایت گرمایی سیال هستند.

۲-۴- معادلات حاکم بر محیط جامد

معادله حاکم بر محیط جامد عبارت از معادله حرکت در آن محیط است که برحسب مولفه‌های جابجایی محیط جامد در قالب معادله نویر-کوشی به صورت زیر قابل بیان است [۳۴].

$$\rho_s \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \mu_s \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} + (\lambda + \mu_s) \frac{\partial^2 u_j}{\partial x_i \partial x_j} \quad (۴)$$

که در این رابطه μ_s ، λ و ρ_s به ترتیب معرف مولفه‌های جابجایی، ضرایب دوگانه لامه و چگالی محیط جامد هستند. بدیهی است که اندرکنش‌های دو محیط سیال و جامد در مرز مشترک آنها صورت می‌گیرد. این اندرکنش‌های دوطرفه بصورت شروط مرزی زیر وارد مجموعه روابط حاکم می‌شوند.

$$\begin{cases} v_i = \dot{u}_i \\ T_{sij} n_j = T_{fij} n_j \end{cases} \quad (۵)$$

در این رابطه T_{sij} و T_{fij} به ترتیب مولفه‌های تانسورهای تنش در محیط‌های جامد و سیال را نشان می‌دهند و داریم:

$$T_{sij} = \mu_s \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \lambda \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij} \quad (۶)$$

$$T_{fij} = \mu_f \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - P \delta_{ij} \quad (۷)$$

در این رابطه δ_{ij} نشان دهنده دلتای کرونکر است.

۴-۴- کارایی مبدل حرارتی

کارایی یک چاه حرارتی در انتقال حرارتی همرفتی را میتوان با بررسی عدد ناسلت مورد بررسی قرار داد. این عدد برای کانال مورد بحث بصورت زیر قابل بیان است.

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (13)$$

در این رابطه $D_h = 4A/P_{wet}$ که در آن A و P_{wet} به ترتیب قطر هیدرولیکی کانال، سطح مقطع جریان و محیط ترشده است. h معرف ضریب انتقال حرارت همرفتی است که با استفاده از رابطه زیر قابل بیان است [۳۵].

$$h = \frac{\dot{m}c_p(T_{m,out} - T_{m,in})}{A_{tot}LMTD} \quad (14)$$

در رابطه فوق $LMTD$ بیانگر تفاضلات دمایی میانگین لگاریتمی است که بصورت زیر تعریف می شود [۳۵].

$$LMTD = \frac{(T_w - T_{m,in}) - (T_w - T_{m,out})}{\ln\left(\frac{T_w - T_{m,in}}{T_w - T_{m,out}}\right)} \quad (15)$$

در این رابطه $T_{m,in}$ و $T_{m,out}$ به ترتیب دمای کلی میانگین در ورودی و خروجی است که بصورت زیر تعریف می شوند [۳۵].

$$T_m = \frac{\int_0^H uTdy}{\int_0^H Tdy} \quad (16)$$

که در این رابطه u و T به ترتیب سرعت سیال در راستای محور کانال و دمای محلی سیال را نشان می دهند. برای داشتن یک چاه حرارتی مناسب، در کنار کارایی قابل قبول در انتقال حرارت، می باید میزان اتلاف هیدرولیکی ناشی از افت فشار سیال در کانال نیز مورد بررسی قرار گیرد. سطح بالاتر اتلاف هیدرولیکی در کانال باعث نیازمندی به توان بالاتری برای پمپ خواهد بود که بازده کلی کانال را کاهش می دهد. ضریب اصطکاک برای یک کانال را می توان بصورت زیر تعریف نمود [۳۶] [۱۸].

$$f = \frac{2 D_h \Delta p}{\rho_f L U_{in}^2} \quad (17)$$

در این رابطه L و Δp به ترتیب نشان دهنده طول کانال و افت فشار درون کانال است. میزان این افت فشار بین ورودی و خروجی بصورت زیر تعریف می شود

$$\Delta p = p_{in} - p_{out} \quad (18)$$

با در نظر گرفتن کارایی کانال از دو جنبه حرارتی و مکانیکی (روابط ۱۳ و ۱۷) می توان کارایی کلی کانال را بصورت زیر تعریف نمود [۳۶] [۱۸].

$$\eta = \frac{Nu}{Nu_0} \left(\frac{f}{f_0}\right)^{1/3} \quad (19)$$

که در آن Nu_0 و f_0 به ترتیب نشان دهنده عدد ناسلت و ضریب اصطکاک برای کانال بدون مولدهای گردابه ای هستند.

۵- صحت سنجی روش بررسی

مساله مورد بحث در تحقیق حاضر یک مساله چند فیزیکی است که تحلیل جریان سیال در حضور مبادلات حرارتی، تحلیل رفتار محیط جامد و بررسی پاسخ جسم پیزوالکتریک را شامل می شود. برای اطمینان از صحت روش مدل سازی سعی می شود، ابعاد مختلف این مساله مورد بررسی قرار گیرد.

۵-۱- بررسی صحت مدل سازی جسم پیزوالکتریک

در مرجع [۳۷] روابط حاکم بر تیر ساندویچی با هسته الاستیک و لایه های عملگر پیزوالکتریک در حالت استاتیکی مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور مقایسه صحت شبیه سازی در مساله حاضر، شرایط دقیق مرجع [۳۷] هم از لحاظ هندسه و هم جنس مواد بکار رفته شبیه سازی گردید. نتیجه حاصل از این مقایسه در شکل ۳ آورده شده است. در این شکل خیز تیر ساندویچی با هسته آلومینیمی با وصله های PZT-5H مقایسه شده است که همانگونه که دیده می شود، تطابق کاملی بین نتایج وجود دارد.

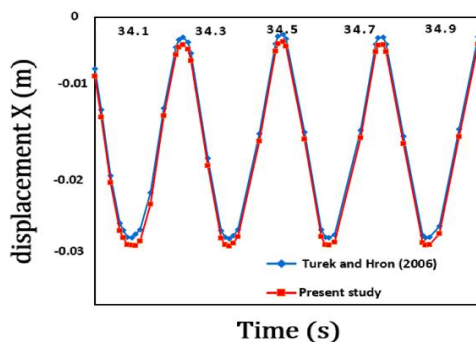
است. در این مرجع رفتار دینامیکی یک تیر پیزوالکتریک یک- سردرگیر مورد بررسی قرار گرفته است. مقایسه نتایج تحقیق حاضر با مرجع [۳۸] در بدست دادن فرکانس‌های طبیعی دو مود اول تیر در جدول ۲ آورده شده است که بازهم نتایج حاکی از دقت مناسب مدلسازی است.

جدول ۲- مقایسه دو فرکانس اول تیر یک سر درگیر با نتایج ارایه شده در مرجع [۳۸].

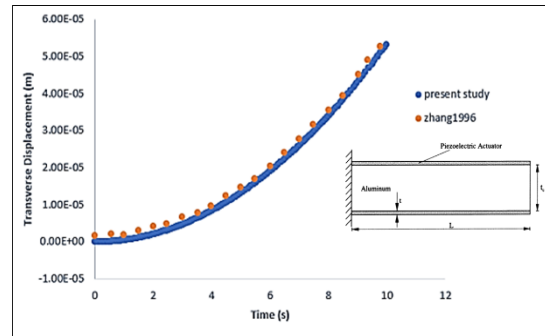
	مقادیر فرکانس ویژه			
	مقاله پارشار و همکاران		پژوهش حاضر	
	مود ۱	مود ۲	مود ۱	مود ۲
	(کیلوهرتز)	(کیلوهرتز)	(کیلوهرتز)	(کیلوهرتز)
تیر تیموشنکو پیزوالکتریک	۹/۵۱۸۷۷	۳۷/۱۷۹	۹/۳۸۱۴	۳۶/۴۹۸۳۴
درصد خطا		+۱/۸۳	-۱/۴۶	
تیر تیموشنکو الاستیک	۹/۲۵۱۱۷	۳۶/۹۵۴	۹/۳۴۹۷	۳۶/۲۰۶۲۵
درصد خطا		+۲	+۱	

۵-۲- بررسی صحت مدلسازی مساله تعامل سیال- جامد با تعاملات حرارتی

به عنوان معیاری برای بررسی صحت روش مدلسازی از نتایج ارایه شده در تحقیق تورک [۳۹] استفاده شده است. با انتخاب مدل FSI2 جایجایی ایجاد شده در نوک تیر به دلیل جریان سیال و میزان نیروی برای تولیدی در زمان‌های مختلف در شکل ۴ و ۵ نشان داده شده‌اند.

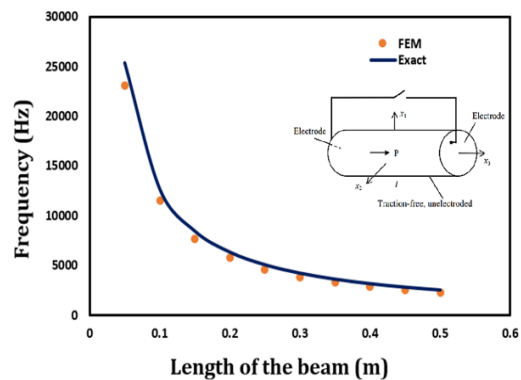


شکل ۴- پاسخ حوزه زمانی جایجایی نوک تیر مدل FSI2 در مرجع [۳۹] و مقایسه با تحقیق حاضر



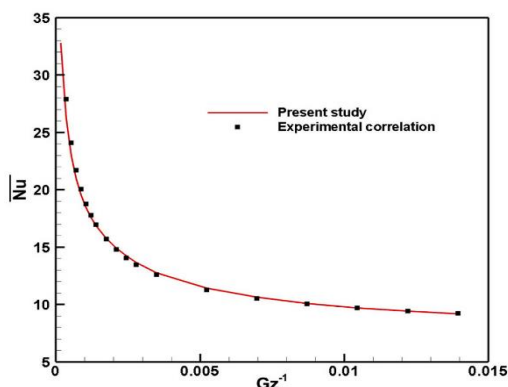
شکل ۲- اعتبار سنجی روش مدلسازی در محاسبه خیز تیر ساندویچی با عملگر پیزوالکتریک در مقایسه با مرجع [۳۷]

به عنوان دومین مساله مورد بررسی، دقت روش مدلسازی محیط پیزوالکتریک در بدست آوردن فرکانس‌های طبیعی در ارتعاشات محوری یک میله بررسی شده است. در مرجع [۳۴] ارتعاشات محوری یک محور پیزوالکتریک با سطح مقطع دایره- ای بررسی شده است. بدین منظور معادلات حرکت استخراج شده و با حل مساله مقدار ویژه مربوطه، مقادیر فرکانس ارتعاشات محوری برای طول‌های مختلف محور محاسبه شده است. با شبیه‌سازی شرایط مشابه به این تحقیق در شکل ۳ مقایسه‌ای بین نتایج تحقیق حاضر و مرجع [۳۴] انجام گرفته است، همانگونه که مشاهده می‌شود، تطابق بسیار خوبی بین نتایج برقرار است.

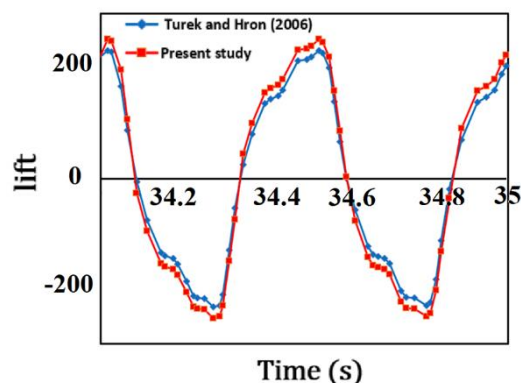


شکل ۳- اعتبار سنجی روش مدلسازی در محاسبه فرکانس‌های طبیعی ارتعاشات محوری یک میله مدور و مقایسه با مرجع [۳۴].

به عنوان مثال سوم و به منظور بررسی صحت مدلسازی در موده‌های بالاتر، از نتایج ارایه شده در مرجع [۳۸] استفاده شده



شکل ۶- بررسی عدد ناسلت میانگین در جریان برحسب معکوس عدد گراتز و مقایسه با مرجع [۴۰].



شکل ۵- تاریخچه نیروی برای ایجاد شده در پژوهش حاضر و مقایسه باننایج مدل FSI2 در مرجع [۳۹].

به منظور جمع‌بندی نتایج بررسی صحت روش شبیه سازی، نتایج بدست آمده برای خطای جذر میانگین مربعات نرمال شده در جدول ۳ نشان داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌گردد، نتایج حاصله نشان دهنده دقت قابل قبول فرایند شبیه سازی است.

جدول ۳- خطای جذر میانگین مربعات نرمال شده برای مسایل در نظر گرفته شده در فرآیند صحت سنجی

کمیت مورد بررسی	NRMSE
جابجایی نوک تیر مدل FSI ۲ در مرجع [۳۹]	۰/۰۴۴
نیروی برا در مدل FSI ۲ در مرجع [۳۹]	۰/۰۶۱
فرکانسهای طبیعی ارتعاشات محوری یک میله مدور [۳۴]	۰/۰۰۴
عدد ناسلت میانگین [۴۰]	۰/۰۰۱

۶- بحث و بررسی نتایج بدست آمده

۶-۱- بررسی استقلال نتایج از شبکه بندی

به منظور بررسی استقلال نتایج از شبکه بندی چهار شبکه مختلف با تعداد المان‌های ۲۰۳۹۴، ۳۷۴۶۸، ۵۶۱۴۱ و ۱۰۷۶۹۵ در نظر گرفته شده است و به اختصار به صورت G1 تا G4 نشان داده می‌شوند. ضریب اصطکاک دارسی، میانگین دمای خروجی و عدد ناسلت برای تمام شبکه بندی‌های ذکر شده محاسبه شده است. نتایج در جدول ۴ نشان داده شده است. همانگونه که دیده میشود، شبکه بندی G3 دقت قابل قبولی را ارائه می دهد و در شبیه سازی‌های این پژوهش مورد

به عنوان مثال دیگر و به منظور صحت سنجی دقت مدل‌سازی در حضور تعاملات حرارتی از نتایج ارایه شده در مرجع [۴۰] استفاده شده است. مساله مورد نظر عبارت است از بررسی تجربی انتقال حرارت بین یک جریان سیال و دو صفحه دما ثابت موازی. چنین نشان داده شده است که عدد ناسلت میانگین در طول کانال از رابطه زیر بدست می‌آید [۴۰].

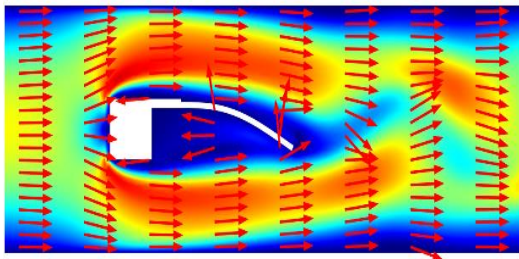
$$Nu = 7.54 + \frac{0.03 Gz}{1 + 0.016 Gz^{2/3}} \quad (20)$$

که در آن $Gz = RePr D_h/L$ معرف عدد گرتز^۱ و $Pr = \nu/\alpha$ عدد پرانتل^۲ است که در این روابط ν و α به ترتیب لزجت سینماتیک و ضریب انتشار حرارتی هستند. از معکوس این عدد می‌توان به عنوان متغیر طول مسیر در راستای جریان استفاده نمود. حاصل مقایسه نتایج حاصل در تحقیق حاضر و مشاهدات تجربی (رابطه ۲۰ [۴۰]) در شکل ۵ نشان داده شده است. قابل ذکر است، این نتایج برای اعداد رینولدز ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ محاسبه شده است و نتایج نشان دهنده دقت مناسب شبیه سازی حاضر است.

² Prandtl number

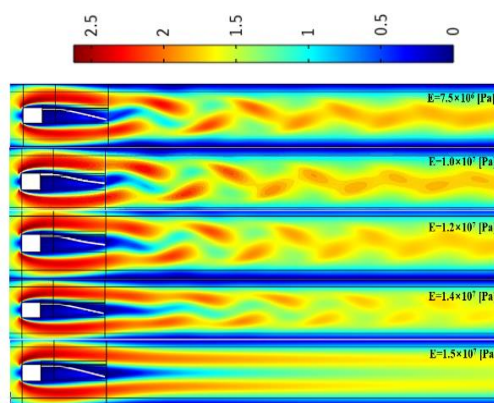
¹ Graetz number

سیال در اطراف مولد گردابه و انحراف آن به سمت دیواره‌های جریان در شکل ۸ نشان داده شده است.



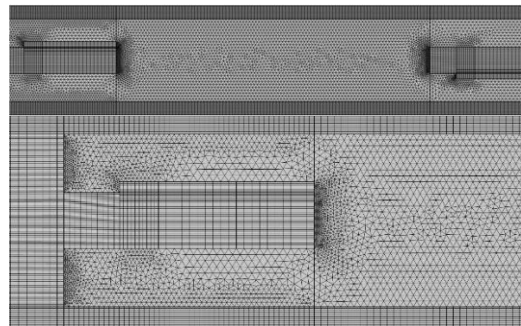
شکل ۸- خطوط جریان در طول میکروکانال و هنگام برخورد با مولد گردابه پیزوالکتریک

قرار گرفتن این مولدها در جریان اگر چه می‌تواند منجر به افزایش نرخ تبدلات حرارتی گردند، به دلیل ایجاد محدودیتی که بر عبور جریان سیال ایجاد می‌کنند، اتلاف هیدرولیکی را نیز به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهند. یکی از مزایای تیغه‌های منعطف کاهش میزان اتلاف هیدرولیکی سیال است [۱۶] و مجهز نمودن این تیغه‌ها به عملگرهای پیزوالکتریک به دلیل اینکه کنترل بیشتری در اختیار قرار می‌دهد، می‌تواند به افزایش کارایی کمک نماید. به دلیل اهمیت تغییر شکل‌های تیغه‌ها در ادامه سعی گردیده است، اثر نرمی تیغه‌ها بر کارایی آنها مورد بررسی بیشتر قرار گیرد. به منظور بررسی عملکرد این مولدها در مساله حاضر کانتورهای سرعت و دما برای تیغه‌هایی با مدول مختلف در شکل ۹ و ۱۰ آورده شده است.



شکل ۹- کانتور سرعت در پنج مدول الاستیسیته متفاوت در حالت میکروکانال با یک مولد گردابه پیزوالکتریک

استفاده قرار گرفته است. همانطور که در شکل نشان داده شده، این شبکه دارای تراکم مناسبی در دیواره‌های بدنه و پشت میکروکانال و هم چنین در ناحیه برخورد مولد گردابه با سیال است. با توجه به اینکه برای شبیه سازی تغییر شکل ناحیه جامد، از تکنیک جابجایی شبکه در اطراف مرزهای تغییر شکل پذیر استفاده شده است، چنین برمی‌آید که این نوع شبکه بندی منجر به حصول نتایجی با دقت مناسب خواهد گردید.



شکل ۷- نمایی از شبکه ایجاد شده در فضای بین مولدهای گردابه و نمای نزدیک شبکه اطراف یک مولد گردابه پیزوالکتریک

جدول ۴- بررسی استقلال شبکه برای کانال با یک مولد گردابه

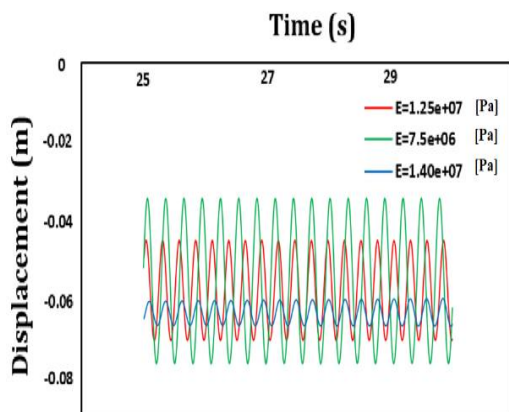
	تعداد شبکه	ضریب اصطکاک	دمای میانگین خروجی (کلوین)	
			میانگین	عدد ناسلت
G1	۲۰۳۹۴	۰/۵۶۳۲	۳۱۰/۹	۵۰/۸۸۳۸۵
G2	۳۷۴۶۸	۰/۶۰۳۸	۳۱۰/۱۸	۴۷/۸۵۰۸۷
G3	۵۶۱۴۱	۰/۶۳۹۸	۳۰۹/۷۰	۴۵/۸۴۲۶۶
G4	۱۰۷۶۹۵	۰/۶۳۹۹	۳۰۹/۶۸	۴۵/۷۵۹۲۲

۲-۶- بررسی نتایج با شبکه بندی انتخاب شده

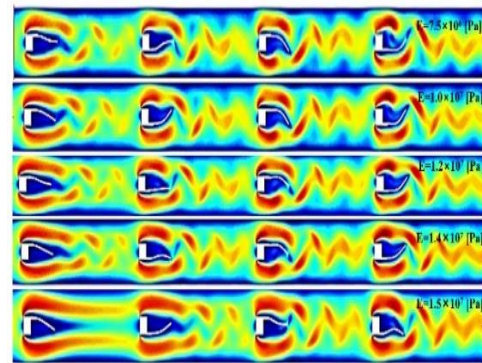
با عبور جریان سیال سرد از روی دیواره های گرم کانال، به دلیل لزج بودن سیال و برقراری شرط عدم لغزش لایه مرزی سرعت و لایه مرزی حرارتی ایجاد و توسعه می‌یابد. هدف اصلی قرار دادن مولدهای گردابه‌ای در جریان سیال از بین بردن و یا کاهش ضخامت این لایه‌های مرزی است. مولدهای گردابه‌ای با تولید گردابه‌هایی موجب جدایش لایه‌های مرزی و در نتیجه اختلاط بیشتر در محیط سیال می‌شوند. انحراف مسیر سرعت

همانگونه که در شکل ۸ دیده می‌شود با حضور مولدهای گردابه، گردابه‌هایی در پایین دست هر مولد ایجاد می‌شود. با افزایش تعداد مولدهای گردابه و همچنین کاهش سفتی تیغه‌های متصل شده به پین‌ها، گردابه‌های ایجاد شده بزرگتر و قویتر می‌شوند؛ در نتیجه قویتر شدن گردابه‌ها حرکت سیال سرد به سمت دیواره‌ها تقویت شده و در اثر آن رشد و پایداری ضخامت لایه مرزی حرارتی مختل شده که نتیجه این اختلاط دمایی به وضوح در اشکال ۱۱ و ۱۲ قابل مشاهده است.

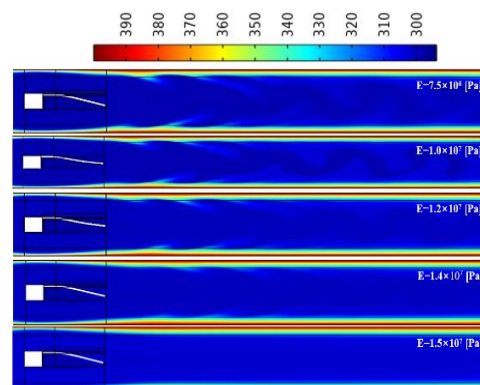
چنین برداشتی می‌شود که افزایش نرخ انتقال حرارت بین سیال و دیواره‌های جریان بطور مستقیم به میزان جابجایی مولد گردابه‌ای مربوط است. به منظور بررسی کمی این میزان جابجایی، تاریخچه زمانی حالت پایای جابجایی نوک تیغه مولد گردابه برای کانال حاوی یک مولد و مولد گردابه‌ای چهارم در یک کانال با چهار مولد در اشکال ۱۳ و ۱۴ آورده شده‌اند. همانگونه که دیده می‌شود با کاهش مدول الاستیک و همچنین افزایش تعداد مولدها به جابجایی‌های بیشتری دست خواهیم یافت. بیشترین میزان اندازه جابجایی مربوط به مولد گردابه با مدول 7.5×10^6 Pa و برای کانال با چهار مولد گردابه است. نکته قابل توجه این است که در حالت کانال با چند مولد گردابه، تیغه‌ها بصورت غیرهمفاز ولی هم فرکانس نوسان می‌کنند.



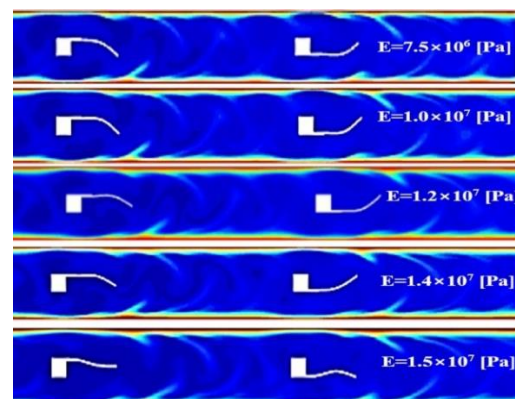
شکل ۱۳- مقایسه تغییر میزان جابجایی در سه مدول الاستیسیته متفاوت در حالت میکروکانال با یک مولد گردابه پیزوالکتریک



شکل ۱۰- کانتور سرعت در پنج مدول الاستیسیته متفاوت در حالت میکروکانال با چهار مولد گردابه پیزوالکتریک



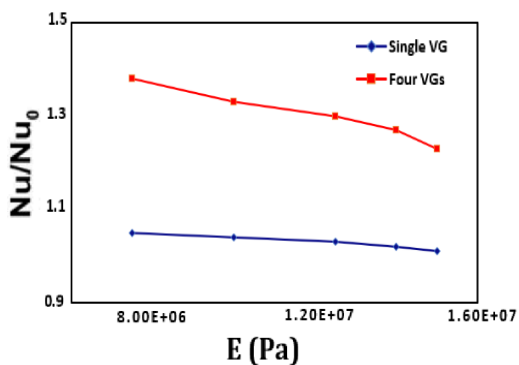
شکل ۱۱- کانتور دما در پنج مدول الاستیسیته متفاوت در حالت میکروکانال با یک مولد گردابه پیزوالکتریک



شکل ۱۲- کانتور دما در پنج مدول الاستیسیته متفاوت در حالت میکروکانال با چهار مولد گردابه پیزوالکتریک (به منظور ارتقای کیفیت تصویر، دو مولد انتهایی از چهار مولد نشان داده شده‌اند)

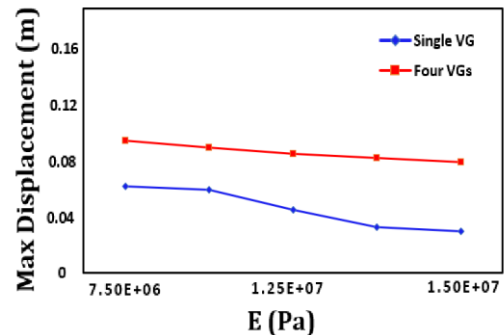
۳-۶- بررسی عملکرد حرارتی-مکانیکی

به منظور بررسی کارایی حرارتی کانال می‌بایست عملکرد حرارتی آن با کانال بدون مولد گردابه مقایسه نمود. همانگونه که ذکر گردید، عملکرد حرارتی کانال را می‌توان با محاسبه عدد ناسلت بصورت کمی مورد تحقیق قرار داد. با محاسبه این عدد برای دو حالت کانال بدون مولد گردابه‌ای و کانال حاوی مولدهای گردابه‌ای می‌توان کارایی حرارتی کانال را مورد تحقیق قرار داد. نتایج این محاسبات در شکل ۱۶ آورده شده است.



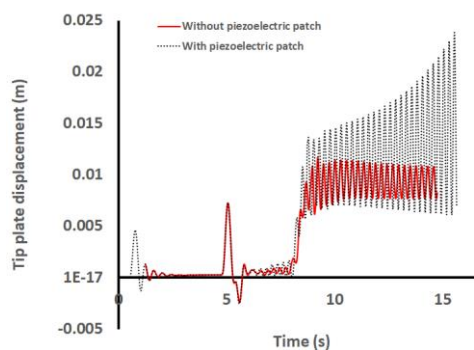
شکل ۱۶- مقادیر عدد ناسلت متوسط برای میکروکانال با یک و چهار مولدگردابه پیزوالکتریک در پنج مدول الاستیسیته مختلف.

همانگونه که دیده می‌شود، تعداد مولدهای گردابه‌ای بیشترین تاثیر را در افزایش نرخ انتقال حرارت کانال دارد. همچنین با سفت‌تر شدن تیغه‌های مولد گردابه، میزان عملکرد حرارتی آنها تا حدودی کاهش می‌یابد. در صورت نصب چهار مولد گردابه میتوان تا ۱۴۰ درصد عملکرد حرارتی کانال را ارتقا بخشید. چنانکه ذکر شد، در کنار بررسی عملکرد حرارتی کانال، لازم است تا میزان اتلاف مکانیکی کانال هم مورد بررسی و دقت قرار گیرد. افزایش میزان اتلاف مکانیکی درون کانال منجر به افزایش توان پمپی مورد نیاز برای ایجاد جریان سیال در کانال می‌شود. نتایج محاسبه نسبت ضریب اصطکاک که نشان دهنده میزان اتلاف مکانیکی ایجاد شده در اثر نصب مولدهای گردابه است، در شکل ۱۷ آورده شده است. در این شکل f_0 میزان ضریب اصطکاک در کانال بدون مولد گردابه است.



شکل ۱۴- مقایسه میزان جابجایی در میکروکانال با یک و چهار مولدگردابه پیزوالکتریک

همانگونه که مشاهده می‌شود با افزایش سفتی تیغه، میزان ارتعاشات کمتر می‌شود. در این حالت نیروی تولیدی وصله پیزوالکتریک توانایی القای ارتعاشات در جسم را نخواهد داشت. بدیهی است که برای رسیدن به حالت بهینه باید مشخصات وصله پیزوالکتریک به تناسب با مشخصات تیغه و جریان انتخاب گردند. در صورت انتخاب مناسب مشخصات تاثیرگذار در مساله، پس از اعمال ولتاژ متناوب به وصله پیزوالکتریک، تیغه متصل شده به مولد گردابه تحریک شده و نتیجه آن افزایش دامنه ارتعاشات و در نتیجه آن افزایش نرخ انتقال حرارت از سیستم خواهد بود. به عنوان مثال چنین رفتاری برای تیغه متصل به مولد گردابه سوم در یک کانال مجهز به چهار مولد در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

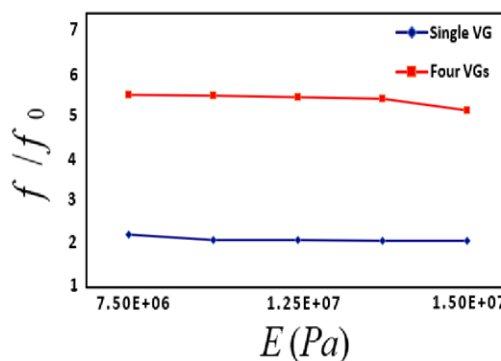


شکل ۱۵- تغییر میزان دامنه ارتعاشات تیغه با سفتی $1.4 \times 10^7 Pa$ در نتیجه اعمال ولتاژ الکتریکی متناوب به وصله پیزوالکتریک

گردابه نسبت به سفتی تیغه‌ها رفتار تقریباً مشابهی را نشان می‌دهند. بدین معنی که کانالی با عملکرد حرارتی بالا، اتلاف مکانیکی بالایی را هم به خود اختصاص داده است. ترکیب این عوامل بگونه‌ای است که بازده کلی حرارتی- مکانیکی مجموعه در هر دو کانال کمتر از یک شده است. بدین ترتیب برای انتخاب شرایط کارکردی برای یک کانال بر حسب اهمیت موضوع نیازمند سبک سنگین کردن موضوع با در نظر گرفتن جوانب کار است. به عنوان مثال برای حالت تیغه با مدول الاستیک $7.5 \times 10^6 Pa$ می‌توان با نصب چهار مولد گردابه پیزوالکتریک با مشخصات ذکر شده به میزان ۱۴۰ درصد نسبت به حالت بدون مولد گردابه، ارتقای کارکرد حرارتی داشت، اما در همین حالت با ضریب اصطکاکی ۵٫۵ برابر مواجه خواهیم بود که بازده کلی حرارتی- مکانیکی فرایند را به 0.77 محدود می‌سازد.

۷- نتیجه گیری

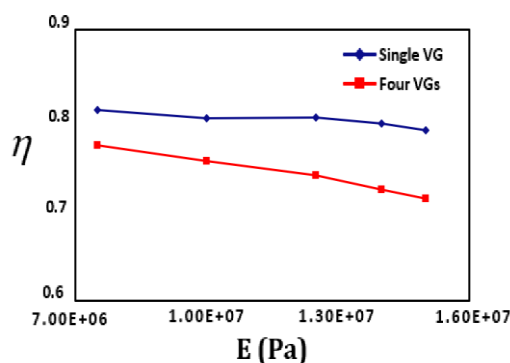
در تحقیق حاضر مساله افزایش نرخ انتقال حرارت در یک میکرو کانال مستطیلی حاوی تعدادی مولد گردابه مورد بررسی قرار گرفت. مولدهای گردابه‌ای در نظر گرفته شده شامل پین های مکعبی هستند که دارای تیغه‌هایی منعطف مجهز به وصله‌های پیزوالکتریک می‌باشند. به منظور اطمینان از برقراری شرایط جریان آرام، عدد رینولدز برحسب قطر هیدرولیکی کانال برابر با ۱۰۰۰ در نظر گرفته شد؛ همچنین برای اطمینان از ایجاد گردابه‌های سیال در پایین دست مولد، عدد رینولدز برحسب ابعاد پین مکعبی برابر ۲۴۴ در نظر گرفته شد. اثرات هیدرولیکی- حرارتی تعداد مولدهای گردابه، سفتی تیغه‌ها و تحریک وصله‌های پیزوالکتریک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان دهنده این واقعیت هستند که مجهز شدن کانال به مولدهای پیزوالکتریک اثر قابل توجهی در افزایش نرخ انتقال حرارت دارد و می‌توان با افزایش ۳۳ درصدی توان مورد نیاز پمپی، به میزان ۱۴۰ درصد نرخ انتقال حرارت را بهبود بخشید. همچنین نتایج بیانگر این واقعیت هستند که در حالتی که ارتعاشات تیغه شکلی پایا دارد میتوان با تحریک وصله‌های پیزوالکتریک باعث ایجاد ارتعاشات بیشتر و در نتیجه آن اختلاط بیشتر جریان سیال درون کانال گردید.



شکل ۱۷- مقادیر ضریب اصطکاک برای میکروکانال با یک و چهار مولد گردابه پیزوالکتریک در پنج مدول الاستیسیته مختلف

همانگونه که دیده می‌شود با افزایش تعداد مولدهای گردابه شاهد افزایش میزان اتلاف مکانیکی درون کانال هستیم و تغییر سفتی تیغه اثر کمی در تغییر میزان این افزایش از خود نشان می‌دهد.

همانگونه که در بخش‌های پیشین هم ذکر گردید، کارایی کلی حرارتی- مکانیکی کانال با استفاده از رابطه ۱۹ محاسبه می‌گردد. بازده کلی حرارتی- مکانیکی برای کانال حاوی یک و چهار مولد گردابه با سفتی‌های مختلف در شکل‌های ۱۸ آورده شده است.



شکل ۱۸- مقادیر ضریب عملکرد برای میکروکانال با یک و چهار مولد گردابه پیزوالکتریک در پنج مدول الاستیسیته مختلف

چنانچه در شکل‌های ۱۶ تا ۱۸ مشاهده می‌گردد، تغییر عملکرد حرارتی و مکانیکی برای کانال با یک و چهار مولد

- [5] Khan, N., Pinjala, D., & Toh, K. C. (2004) Pool boiling heat transfer enhancement by surface modification/micro-structures for electronics cooling: a review. Proc 6th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC 2004)(IEEE Cat. No. 04EX971): 273-280.
- [6] Kakaç, S., & Pramuanjaroenkij, A (2009) Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids. Int. J. Heat Mass Transf. 52(13-14): 3187-3196.
- [7] Webb, R. L., & Kim, N. Y (2005) Enhanced heat transfer. Taylor and Francis, NY.
- [8] Hosseini, S., Aghebatandish, S., Dadvand, A., & Khoo, B. C (2021) An immersed boundary-lattice Boltzmann method with multi relaxation time for solving flow-induced vibrations of an elastic vortex generator and its effect on heat transfer and mixing. Chem. Eng. J. 405: 126652.
- [9] Fiebig, M (1998) Vortices, generators and heat transfer. Chem. Eng. Res. Des. 76(2): 108-123.
- [10] Awais, M., & Bhuiyan, A. A (2018) Heat transfer enhancement using different types of vortex generators (VGs): A review on experimental and numerical activities. Therm. Sci. Eng. Prog. 5: 524-545.
- [11] Lambert, R. A., & Rangel, R. H (2010) The role of elastic flap deformation on fluid mixing in a microchannel. Phys. Fluids 22(5): 052003.
- [12] Mirzaee, H., Dadvand, A., Mirzaee, I., & Shabani, R (2012) Heat transfer enhancement in microchannels using an elastic vortex generator. J. Enhanced Heat Transfer 19(3).
- [13] Sparrow, E. M., Baliga, B. R., & Patankar, S. V (1977) Heat transfer and fluid flow analysis of interrupted-wall channels, with application to heat exchangers: 4-11
- [14] Kaci, H. M., Habchi, C., Lemenand, T., Della Valle, D., & Peerhossaini, H (2010) Flow structure and heat transfer induced by embedded vorticity. Int. J. Heat Mass Transfer 53(17-18): 3575-3584.
- [15] Fiebig, M (1995) Embedded vortices in internal flow: heat transfer and pressure loss enhancement. Int. J. Heat Fluid Flow 16(5): 376-388.
- [16] Dadvand, A., Hosseini, S., Aghebatandish, S., & Khoo, B. C (2019) Enhancement of heat and mass transfer in a microchannel via passive oscillation of a flexible vortex generator. Chem. Eng. Sci. 207: 556-580.
- [17] Sun, X., Ye, Z., Li, J., Wen, K., & Tian, H (2019) Forced convection heat transfer from a circular cylinder with a flexible fin. Int. J. Heat Mass Transf. 128: 319-334.
- [18] Hosseinirad, E., Khoshvaght-Aliabadi, M., & Hormozi, F (2019) Effects of splitter shape on

۸- فهرست علائم

v	سرعت سیال، m/s
P	فشار، N/m ²
Re	عدد رینولدز، -
μ	ویسکوزیته دینامیکی سیال، Pa.s
ρ _f	چگالی سیال، Kg/m ³
k _f	ضریب هدایتی سیال، W/(m.K)
U _{in}	سرعت ورودی سیال، m/s
C _p	ظرفیت گرمایی ویژه سیال، J/(kg.K)
θ	ضریب پواسون، -
H	عرض میکروکانال، m
L	طول میکروکانال، m
a	طول تکیه‌گاه مربعی، m
ρ _s	چگالی میله جامد الاستیک، Kg/m ³
L _p	طول میله جامد الاستیک، m
h _p	ضخامت میله جامد الاستیک، m
L _{pi}	طول قطعه پیزوالکتریک، m
h _h	ضخامت قطعه پیزوالکتریک، m
u	جابجایی محیط جامد، m
λ, μ _s	ضرایب لامه، N/m ²
D	جابجایی الکتریکی، C/m ²
φ	میدان پتانسیل الکتریکی، V
E	میدان الکتریکی، V/m
D _h	قطر هیدرولیکی کانال، m
A	سطح مقطع جریان، m ²
P _{wet}	محیط ترشده، m
T _{m,in}	دمای کلی میانگین در ورودی، K
T _{m,out}	دمای کلی میانگین در ورودی، K
f	ضریب اصطکاک کانال، -
η	کارایی کلی کانال، -

مراجع

- [1] Sheikholeslami M, Gorji-Bandpy M, Ganji DD (2015) Review of heat transfer enhancement methods: Focus on passive methods using swirl flow devices. Renew. Sust. Energ. Rev. 49: 444-69
- [2] Joule JP (1861) VIII. On the surface-condensation of steam. Philos. Trans. Royal Soc. 151: 133-60.
- [3] Bergles AE (2011) Recent developments in enhanced heat transfer. Heat Mass Transf 47(8):1001-8.
- [4] Léal, L., Miscevic, M., Lavieille, P., Amokrane, M., Pigache, F., Topin, F., ... & Tadrist, L (2013) An overview of heat transfer enhancement methods and new perspectives: Focus on active methods using electroactive materials. Int. J. Heat Mass Transf. 61: 505-524.

- [29] Kang, M. S, Park, S. G, Dinh, C. T (2023) Heat transfer enhancement by a pair of asymmetric flexible vortex generators and thermal performance prediction using machine learning algorithms. *Int. J. Heat Mass Transfer* 200: 123518.
- [30] Pham R, Wang S, Dahlgren J, Grindstaff N, Chen C. L (2022). Thermal-hydraulic-dynamic investigation of an inverted self-fluttering vortex generator. *Int. J. Heat Mass Transfer* 197: 123374.
- [31] Brodnianská Z, Kotšmíd S (2022) Heat Transfer Enhancement in the Novel Wavy Shaped Heat Exchanger Channel with Cylindrical Vortex Generators. *Appl. Therm. Eng.* 119720.
- [32] Latif U, Younis M. Y, Idrees S, Uddin E, Abdelkefi A, Munir A, Zhao M (2023) Synergistic analysis of wake effect of two cylinders on energy harvesting characteristics of piezoelectric flag. *Renewable Sustainable Energy Rev.* 173: 113114.
- [33] Cengel Y, Cimbala J (2013) *Fluid Mechanics Fundamentals and Applications (SI units)*. 4th edn. McGraw Hill.
- [34] Yang, J (2005) *An introduction to the theory of piezoelectricity (Vol. 9, p. 9)*. New York: Springer.
- [35] Bejan, A (2013) *Convection heat transfer*. John Wiley & sons.
- [36] Webb, R. L (1981) Performance evaluation criteria for use of enhanced heat transfer surfaces in heat exchanger design. *Int. J. Heat Mass Transfer* 24(4): 715-726.
- [37] Zhang, X. D., & Sun, C. T (1996) Formulation of an adaptive sandwich beam. *Smart Mater. Struct.* 5(6), 814.
- [38] Parashar, S. K., Von Wagner, U., & Hagedorn, P (2004) A modified Timoshenko beam theory for nonlinear shear-induced flexural vibrations of piezoceramic continua. *Nonlinear Dyn.* 37(3): 181-205.
- [39] Turek, S., & Hron, J (2006) Proposal for numerical benchmarking of fluid-structure interaction between an elastic object and laminar incompressible flow. In: Bungartz, H.J., Schäfer, M. (eds) *Fluid-structure interaction*: 371-385
- [40] Edwards, D. K., Denny, V. E., & Mills, A. F (1978) *Transfer processes. an introduction to diffusion, convection and radiation*. Series in Thermal and Fluids Engineering.
- thermal-hydraulic characteristics of plate-pin-fin heat sink (PPFHS). *Int. J. Heat Mass Transfer* 143: 118586.
- [19] Yu, X., Feng, J., Feng, Q., & Wang, Q (2005) Development of a plate-pin fin heat sink and its performance comparisons with a plate fin heat sink. *Appl. Therm. Eng.* 25(2-3): 173-182.
- [20] Razavi, S. E., Osanloo, B., & Sajedi, R (2015) Application of splitter plate on the modification of hydro-thermal behavior of PPFHS. *Appl. Therm. Eng.* 80: 97-108.
- [21] Yeom, T., Simon, T., Zhang, M., Yu, Y., & Cui, T (2018) Active heat sink with piezoelectric translational agitators, piezoelectric synthetic jets, and micro pin fin arrays. *Exp. Therm Fluid Sci.* 99: 190-199.
- [22] Li, X. J., Zhang, J. Z., & Tan, X. M (2018) An investigation on convective heat transfer performance around piezoelectric fan vibration envelope in a forced channel flow. *Int. J. Heat Mass Transfer* 126: 48-65.
- [23] Kimber, M., & Garimella, S. V (2009) Cooling performance of arrays of vibrating cantilevers. *J. Heat Transfer* 131(11).
- [24] Sufian, S. F., & Abdullah, M. Z (2017) Heat transfer enhancement of LEDs with a combination of piezoelectric fans and a heat sink. *Microelectron. Reliab.* 68: 39-50.
- [25] Chen, Y., Peng, D., & Liu, Y (2020) Heat transfer enhancement of turbulent channel flow using a piezoelectric fan. *Int. J. Heat Mass Transf.* 147: 118964.
- [26] Sheu, W. J., Chen, G. J., & Wang, C. C (2015) Performance of piezoelectric fins for heat dissipation. *Int. J. Heat Mass Transf.* 86: 72-77.
- [27] Wait, S. M., Basak, S., Garimella, S. V., & Raman, A (2007) Piezoelectric fans using higher flexural modes for electronics cooling applications. *IEEE Trans. Compon. Packag. Technol.* 30(1): 119-128.
- [28] Yeom, T., Simon, T. W., Huang, L., North, M. T., & Cui, T (2012) Piezoelectric translational agitation for enhancing forced-convection channel-flow heat transfer. *Int. J. Heat Mass Transfer* 55(25-26): 7398-7409.