



دانشکده مهندسی مکانیک گروه حرارت و سیالات

مطالعه عددی خنککاری پیل سوختی غشاء پلیمری با استفاده از نانو سیال

دانشجو: مصطفى كردى

اساتید راهنما: دکتر علی جباری مقدم دکتر محمود فرزانهگرد

استاد مشاور: دکتر ابراهیم افشاری

پایاننامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهريور ۱۳۹۴

دانشگاه شاهرود

دانشکده : مهندسی مکانیک گروه : حرارت و سیالات

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای مصطفی کردی

تحت عنوان: مطالعه عددی خنک کاری پیل سوختی غشاء پلیمری با استفاده از نانو سیال

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد

مورد ارزیابی و با درجهقرار گرفت.

امضاء	اساتيد مشاور	امضاء	اساتيد راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نماينده تحصيلات تكميلى	امضاء	اساتيد داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

۵۰۰۰ لفارکم به ۰۰

يدر و مادر خوبم چ

پس از سپاس به درگاه **فداوند مربان،** بر خود لازم میدانم تا از تمام افرادی که مرا در نگارش این اثر یاری نمودند تشکر و قدردانی نمایم. از خداوند متعال سلامتی و توفیق روزافزون برای یکایک ایشان خواستارم.

از مرومادرو فانواده عزیزم که در کلیه مراحل زندگی پشتیبان و مشوقم بودند تشکر میکنم.

از اساتید گرامی ج**ناب آقای دکتر علی جباری مقدم** و ج**ناب آقای دکتر محمود فرزانه کرد** که از ابتدای دوران دانشجویی از آموزشها و راهنماییهای ارزنده ایشان بهره بردم تشکر میکنم.

از استاد محترم جناب آقای دلتر ابراییم افتاری که طی نگارش پایان نامه از رهنمودهای بی دریغ ایشان بهره بردم تشکر میکنم.

٥

تعهد نامه

اینجانب مصطفی کردی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک-گرایش تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان "مطالعه عددی خنککاری پیل سوختی غشاء پلیمری با استفاده از نانو سیال"تحت راهنمائی دکتر علی جباری مقدم، دکتر محمود فرزانه گرد و دکتر ابراهیم افشاری متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
 - در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.

تاريخ

- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده
 نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود
 » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایح اصلی پایان نامه تأثیر گذار بودهاند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول
 اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است
 اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانهای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
 - استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

یکی از مباحث مهم در حوزه پیلهای سوختی غشاء پلیمری، مبحث مدیریت گرما در پیل میباشد. در واقع مدیریت گرما در پیل، نگه داشتن دمای کارکرد آن در بازه مناسب و تلاش جهت یکنواخت کردن توزیع دما در نقاط مختلف پیل است. توزیع دما، تأثیر زیادی بر میزان کارایی، بازده و عمر مفید پيل سوختي دارد. معمولاً جهت خنگكاري پيل سوختي غشاء پليمري با توان بالا، آب را از كانالهايي که در صفحات خنککاری تعبیه شدهاند عبور میدهند. تا امروز، مطالعات بسیار اندکی در خصوص بهبود وضعیت خنککاری پیل صورت گرفته و تقریباً هیچ تحقیقی در راستای خنککاری داخل پیل با نانو سیال انجام نشده است. در این مطالعه، خنک کاری پیل سوختی غشاء پلیمری با استفاده از نانو سیال به شیوه عددی بررسی گردیده است. از میان شیوههای مختلف شبیهسازی نانو سیال، روش تکفازی همگن انتخاب شده و خواص ترموفیزیکی نانو سیال به صورت تابعی از دما و غلظت حجمی نانو ذرات در نظر گرفته شده است. صحت و دقت شیوه انتخاب شده جهت شبیهسازی، با حل مسأله جریان نانو سیال در لوله بررسی گردیده است. نتایج نشان میدهند روش انتخاب شده از دقت خوبی برخوردار است. در این پایاننامه، خنککاری پیل سوختی و مسأله جریان سیال و انتقال حرارت در چهار صفحه خنککاری با چهار سیال خنککننده مختلف بررسی شده است. اولین سیال آب و سه سیال بعدی، نانو سیال با سه غلظت متفاوت هستند. جریان هرکدام از این سیالها تحت سه عدد رینولدز ورودی متفاوت در نظر گرفته شده است. عملکرد سیالات خنککننده متفاوت و همچنین عملکرد صفحات خنککاری مختلف مورد مطالعه قرار گرفته و از نظر کمیتهای حداکثر اختلاف دمای سطح، یکنواختی دما در سطح و افت فشار مقایسه شدهاند. در ادامه تأثیر پارامترهایی چون عدد رینولدز ورودی، هندسه و غلظت نانو ذرات بر این کمیتها بررسی شده است. نتایج نشان میدهند، از میان صفحات خنککاری مختلف، میدان جریان مارپیچی چند مسیره، بهترین عملکرد را دارد. همچنین استفاده از نانو سیال باعث ارتقاء وضعیت خنککاری و بهبود چشم گیر در پارامترهای دمایی که بر بازده و عملکرد پیل تأثیر مستقیم دارند می شود. با افزایش غلظت نانو ذرات به میزان ۲۰۰۶، شاخص یکنواختی دما حدود ۱۳ درصد کاهش، اختلاف دمای حداقل و حداکثر در سطح صفحه خنککاری حدود ۱۳ درصد کاهش و افت فشار حدود ۳۵ درصد افزایش مییابد.

كلمات كليدى

پيل سوختي غشاء پليمري، خنككاري، ماكزيمم دما، افت فشار، توزيع يكنواخت دما، نانو سيال

۱.	فصل اوّل پیل سوختی غشاء پلیمری
۲.	۱–۱) مقدمه
۶	۱-۲) طول عمر و هزینه پیل سوختی غشاء پلیمری
٨.	۱–۳) اجزای پیل سوختی غشاء پلیمری
۹.	۱–۳–۱) غشاء
١٠	۱–۳–۲) لایه کاتالیست
۱۱	۱–۳–۳) لایه پخش گاز
۱۱	۱–۳–۴) صفحات قطبی
١٢	۱-۳-۵) صفحات خنک کاری
۱۴	۱-۴) توده پیل سوختی غشاء پلیمری
۱۴	۵-۱) نحوه عملکرد پیل سوختی غشاء پلیمری
۱۷	۱-۶) بازده پیل سوختی غشاء پلیمری
۱۹	فصل دوم خنککاری پیل سوختی غشاء پلیمری
۱۹ ۲۰	فصل دوم خنککاری پیل سوختی غشاء پلیمری ۲-۱) تولید حرارت در پیل سوختی غشاء پلیمری
۱۹ ۲۰ ۲۲	فصل دوم خنککاری پیل سوختی غشاء پلیمری ۲-۱) تولید حرارت در پیل سوختی غشاء پلیمری ۲-۲) مدیریت گرما در پیل سوختی غشاء پلیمری
۱۹ ۲۰ ۲۲ ۲۵	فصل دوم خنککاری پیل سوختی غشاء پلیمری ۲-۱) تولید حرارت در پیل سوختی غشاء پلیمری ۲-۲) مدیریت گرما در پیل سوختی غشاء پلیمری
۱۹ ۲۰ ۲۲ ۲۵	فصل دوم خنککاری پیل سوختی غشاء پلیمری ۲-۱) تولید حرارت در پیل سوختی غشاء پلیمری ۲-۲) مدیریت گرما در پیل سوختی غشاء پلیمری ۲-۳) روشهای خنککاری پیل سوختی غشاء پلیمری و مروری بر تحقیقات پیشین
۱۹ ۲۰ ۲۲ ۲۵ ۲۷	فصل دوم خنککاری پیل سوختی غشاء پلیمری ۲–۱) تولید حرارت در پیل سوختی غشاء پلیمری ۲–۲) مدیریت گرما در پیل سوختی غشاء پلیمری و مروری بر تحقیقات پیشین ۲–۳) روشهای خنککاری پیل سوختی غشاء پلیمری و مروری بر تحقیقات پیشین ۲–۳–۱) خنککاری توسط پخشکنندههای حرارت
۱۹ ۲۰ ۲۲ ۲۵ ۲۸ ۲۸	فصل دوم خنککاری پیل سوختی غشاء پلیمری ۲-۱) تولید حرارت در پیل سوختی غشاء پلیمری ۲-۲) مدیریت گرما در پیل سوختی غشاء پلیمری و مروری بر تحقیقات پیشین ۲-۳) روشهای خنککاری پیل سوختی غشاء پلیمری و مروری بر تحقیقات پیشین ۲-۳-۱) خنککاری توسط پخشکنندههای حرارت
۱۹ ۲۰ ۲۲ ۲۸ ۲۸ ۲۸	فصل دوم خنک کاری پیل سوختی غشاء پلیمری ۲–۱) تولید حرارت در پیل سوختی غشاء پلیمری ۲–۲) مدیریت گرما در پیل سوختی غشاء پلیمری و مروری بر تحقیقات پیشین ۲–۳) روش های خنک کاری پیل سوختی غشاء پلیمری و مروری بر تحقیقات پیشین ۲–۳–۱) خنک کاری توسط پخش کننده های حرارت
۱۹ ۲۰ ۲۵ ۲۸ ۲۸ ۲۸ ۳۱	فصل دوم خنککاری پیل سوختی غشاء پلیمری ۲-۱) تولید حرارت در پیل سوختی غشاء پلیمری ۲-۲) مدیریت گرما در پیل سوختی غشاء پلیمری و مروری بر تحقیقات پیشین ۲-۳) روشهای خنککاری پیل سوختی غشاء پلیمری و مروری بر تحقیقات پیشین ۲-۳-۱) خنککاری توسط پخشکنندههای حرارت ۲-۳-۲) خنککاری با جریان هوا ۲-۳-۲) خنککاری با مایع
۱۹ ۲۰ ۲۵ ۲۸ ۲۸ ۳۱ ۳۲	فصل دوم خنککاری پیل سوختی غشاء پلیمری ۲-۱) تولید حرارت در پیل سوختی غشاء پلیمری ۲-۲) مدیریت گرما در پیل سوختی غشاء پلیمری و مروری بر تحقیقات پیشین ۲-۳) روشهای خنککاری پیل سوختی غشاء پلیمری و مروری بر تحقیقات پیشین ۲-۳-۱) خنککاری توسط پخش کنندههای حرارت ۲-۳-۲) خنککاری با مریان هوا
19 77 70 77 78 78 78 77 77	فصل دوم خنک کاری پیل سوختی غشاء پلیمری

۳۷.	فصل سوم نانو سيال
۳۸.	۳–۱) مقدمه
۴١.	۳-۲) خواص ترموفیزیکی نانو سیالات
47.	۳-۲-۱) چگالی نانو سیال
47.	۳-۲-۲) ظرفیت گرمایی ویژه نانو سیال
۴٣.	۳-۲-۳) ويسكوزيته نانو سيال
44.	۳-۲-۴) ضریب هدایت حرارتی نانو سیال
۴۷.	۳-۲-۴-۱) بررسی آزمایشگاهی هدایت حرارتی نانو سیال
۴٨.	۳-۲-۴-۲) بررسی تئوری هدایت حرارتی نانو سیال
49.	۳-۳) خواص نانو سيال Al ₂ O ₃ -آب
49.	۳-۳-۱) ضریب هدایت حرارتی
۵۲.	۳–۳–۲) ويسكوزيته
۵۴.	۳-۳-۳) چگالی
۵۵.	۳-۳-۴) ظرفیت حرارتی ویژه
۵۵.	۳-۴) پايدارى نانو سيالات
۵۷.	۵-۳) روشهای شبیهسازی نانو سیالات
۵۷.	۳–۵–۱) روشهای تک فازی
۵٩.	۳-۵-۲) روشهای دو فازی
۶۰.	۳–۵–۳) شیوه شبیهسازی نانو سیال در این پایاننامه
۶۳.	فصل چهارم نانو سیال در لوله
۶۴.	۴–۱) مقدمه و پیشینه
۶۷.	۲-۴) شرح مسأله
۶۸.	۴-۳) معادلات حاکم
۷۰.	۴-۴) روش حل مسأله
۷۲.	۴-۵) ارائه نتایج و بحث
۷۲.	۴-۵-۱) ضریب انتقال حرارت جابهجایی

٧۶	۴–۵–۲) افت فشار
٧۶	۴-۶) نتیجه گیری
٧٩	فصل پنجم بیان مسأله و روش حل
٨٠	۵–۱) مقدمه
۸۱	۵–۲) مدل هندسی
۸۳	۵-۳) شرایط مرزی
۸۵	4-۵) معادلات حاکم
٨۶	۵-۵) روش حل مسأله
٨٩	فصل ششم ارائه نتايج و بحث
٩٠	۶-۱) عدم وابستگی نتایج عددی به شبکه محاسباتی
۹۱	۶–۲) اعتبار سنجی نتایج
۹۷	۶-۳) توزیع دما، فشار و ویسکوزیته نانو سیال در صفحات خنککاری
۱۰۶	۶-۴) نتایج حل عددی و بحث پیرامون آنها
111	۶-۴-۱) مقایسه عملکرد آب و نانو سیال در صفحات خنککاری مختلف
۱۱۹	۶-۴-۲) مقایسه عملکرد صفحات خنککاری مختلف با نانو سیال
179	۵-۶) نتیجه گیری
۱۳۱	۶–۶) پیشنهادات پژوهشی
۱۳۳	پيوست
۱۳۷	مراجع

فهرست اشكال

٣	۱-۱: مفهوم عمومی یک پیل سوختی هیدروژن- اکسیژن	شكل
۹	۲-۱: شماتیک اجزای پیل سوختی	شكل
١۶.	۲-۱: نحوه عملکرد پیل سوختی غشاء پلیمری	شكل
۲١.	۲-۱: حرارت و توان تولیدی به واحد سطح در پیل بر حسب شدت جریانهای مختلف	شكل
24	۲-۲: میزان رسانایی نافیون بر حسب محتوای آب موجود در آن	شكل
۲۵.	۲-۳: اثر نامطلوب تجمع آب بر عملکرد پیل	شكل
٣٩	۲-۳: تصاوير نانو سيال الف) نانو سيال Al2O3-آب ب) نانو سيال ZnO-آب	شكل
49	۲-۳ : لایه بندی سیال در اطراف نانو ذرات	شكل
۵١.	۳-۳: هدایت حرارتی نانو سیال Al2O3-آب بر حسب دما برای دو غلظت ۰/۰۶ و ۰/۰۱	شكل
در	. ۳-۴: نسبت ضریب هدایت حرارتی نانو سیال Al2O3-آب به ضریب هدایت حرارتی آب	شكل
۵١.	نهای مختلف	غلظن
۵۳.	۵-۳: ویسکوزیته نانو سیال Al ₂ O3-آب بر حسب دما برای دو غلظت ۰/۰۶ و ۰/۰۱	شكل
۵۳.	۳-۶: نسبت ویسکوزیته نانو سیال Al ₂ O ₃ -آب به ویسکوزیته آب در غلظتهای مختلف	شكل
۵۴.	۲-۳: چگالی نانو سیال Al2O3-آب بر حسب دما برای دو غلظت ۰/۰۶ و ۰/۰۱	شكل
۵۵	۸-۳: ظرفیت حرارتی ویژه نانو سیال Al ₂ O ₃ -آب بر حسب دما برای دو غلظت ۰/۰۶ و ۰/۰۱	شكل
۵۶.	۳-۹: میزان پایداری نانو سیال Al2O3-آب با غلظتهای ۰/۱، ۳/۲ و ۵/۰ درصد	شكل
۷١.	۴-۱: روند همگرایی پاسخ- غلظت نانو ذرات ۲۷۶ ۰ و عدد رینولدز ورودی ۹۳۰	شكل
۷۲	۴-۲: ضریب انتقال حرارت جابهجایی در لوله در رینولدز ورودی ۸۷۰ و غلظت ۱۳۲ ۰/۰	شكل
۷٣	۴-۳: ضریب انتقال حرارت جابهجایی در لوله در رینولدز ۱۸۸۸ و غلظت ۰/۰۱۳۲	شكل
۷٣	۴-۴: ضریب انتقال حرارت جابهجایی در لوله در رینولدز ورودی ۹۳۰ و غلظت ۰/۰۲۷۶	شكل
۷۴.	۴-۵: ضریب انتقال حرارت جابهجایی در لوله در رینولدز ورودی ۱۱۳۱ و غلظت ۰/۰۲۷۶	شكل
۷۵	۴-۶: ضریب انتقال حرارت جابهجایی در لوله در رینولدز ورودی ۸۸۷ و غلظت ۰/۰۶	شكل
۷۵	۲-۴: ضریب انتقال حرارت جابهجایی در لوله در رینولدز ورودی ۱۰۸۹ و غلظت ۰/۰۶	شكل
۸۲	۵-۱: طرحهای مختلف برای صفحه خنککاری	شكل
ہ به	۵-۲: شماتیکی از هندسه استفاده شده برای شبیهسازی میدان جریان مارپیچی چند مسیره	شكل
۸٣	، شرایط مرزی	همراد

۸۷	شکل ۵-۳: ساختار مش شبکه صفحه خنککاری
ی ۶۰۶ ۸۸	شکل ۵-۴: روند همگرایی پاسخ در مدل B- غلظت نانو ذرات ۰۶-۰/۰ و عدد رینولدز ورود
٩٠	شکل ۶-۱: نتایج بررسی استقلال نتایج حل از تعداد سلولهای شبکه برای مدل A
91۴	شکل ۶-۲: ضریب اصطکاک و افت فشار در طول کانال برای مدل C در رینولدز ورودی ۵
۹۴	شکل ۶-۳: افت فشار عددی و تحلیلی بر حسب رینولدز ورودی برای مدل A
۹۴	شکل ۶-۴: افت فشار عددی و تحلیلی بر حسب رینولدز ورودی برای مدل C
ر کانال برای	شکل ۶-۵: مقادیردمای میانگین سیال، دمای متوسط سطح کانال و عدد ناسلت جریان د
۹۵	مدل C به ازای عدد رینولدز ورودی ۶۷
٩٩	شکل ۶-۶: توزیع دما بر حسب درجه سلسیوس در سطح میانی کانالهای خنککاری
۱۰۰.	شکل ۶-۲: توزیع دما بر حسب درجه سلسیوس در سطح میانی کانالهای خنککاری
۱۰۱	شکل ۶-۸: توزیع دما بر حسب درجه سلسیوس در سطح تقارن صفحات خنککاری
۱۰۲	شکل ۶-۹: توزیع دما در سطح تقارن صفحات خنک کاری
۱۰۳	شکل ۶-۱۰: توزیع فشار بر حسب پاسکال در کانالهای صفحات خنککاری
۱۰۴	شکل ۶-۱۱: توزیع فشار بر حسب پاسکال در کانالهای صفحات خنککاری
های صفحات	شکل ۶-۱۲: تغییرات ویسکوزیته نانو سیال بر حسب پاسکال ثانیه در سطح میانی کانال
۱۰۵	خنککاری
های صفحات	شکل ۶-۱۳: تغییرات ویسکوزیته نانو سیال بر حسب پاسکال ثانیه در سطح میانی کانال
۱۰۶	خنککاری
ظتها۱۱۳	شکل ۶-۱۴: شاخص یکنواختی دما بر حسب عدد رینولدز برای مدل A به ازای تمامی غل
ل A به ازای	شکل ۶-۱۵: نمودار اختلاف دمای حداکثر و حداقل بر حسب عدد رینولدز ورودی برای مد
۱۱۳	تمامی غلظتها
غلظتها ۱۱۳	شکل ۶-۱۶: نمودار افت فشار بر حسب عدد رینولدز ورودی برای مدل A به ازای تمامی خ
، ازای تمامی	شکل ۶-۱۷: نمودار شاخص یکنواختی دما بر حسب عدد رینولدز ورودی برای مدل B به
114	غلظتها
ل B به ازای	شکل ۶-۱۸: نمودار اختلاف دمای حداکثر و حداقل بر حسب عدد رینولدز ورودی برای مد
116	ﺗﻤﺎﻣﻰ ﻏﻠﻈﺖﻫﺎ
فلظتها ۱۱۴	شکل ۶-۱۹: نمودار افت فشار بر حسب عدد رینولدز ورودی برای مدل B به ازای تمامی خ
ظتها۱۵	شکل ۶-۲۰: شاخص یکنواختی دما بر حسب عدد رینولدز برای مدل C به ازای تمامی غل

شکل ۶-۲۱: اختلاف دمای حداکثر و حداقل بر حسب عدد رینولدز ورودی برای مدل $\mathrm C$ به ازای تمامی
غلظتها
شکل ۶-۲۲: افت فشار بر حسب عدد رینولدز ورودی برای مدل ${ m C}$ به ازای تمامی غلظتها
شکل ۶-۲۳: شاخص یکنواختی دما بر حسب عدد رینولدز برای مدل D به ازای تمامی غلظتها ۱۱۶
شکل ۶-۲۴: نمودار اختلاف دمای حداکثر و حداقل بر حسب عدد رینولدز ورودی برای مدل D به ازای
تمامی غلظتها
شکل ۶-۲۵: نمودار افت فشار بر حسب عدد رینولدز ورودی برای مدل D به ازای تمامی غلظتها ۱۱۶
شکل ۶-۲۶: شاخص یکنواختی دما در تمام غلظتها-مدلهای A,B,D: رینولدز ورودی ۴۰۴ و مدل
C: رينولدز ۴۵
شکل ۶-۲۷: شاخص یکنواختی دما در تمام غلظتها-مدلهای A,B,D: رینولدز ورودی ۵۰۵ و مدل
C: ورودی ۵۶
شکل ۶-۲۸: شاخص یکنواختی دما در تمام غلظتها-مدلهای A,B,D: رینولدز ورودی ۶۰۶ و مدل
C: رينولدز ۶۷
شکل ۶-۲۹: اختلاف دمای حداکثر و حداقل- مدلهای A,B,D: رینولدز ورودی ۴۰۴ و مدل C: رینولدز
ورودی ۴۵
شکل ۶-۳۰: اختلاف دمای حداکثر و حداقل- مدلهای A,B,D: رینولدز ورودی ۵۰۵ و مدل C: رینولدز
ورودی ۵۶
شکل ۶-۳۱: اختلاف دمای حداکثر و حداقل- مدلهای A,B,D: رینولدز ورودی ۶۰۶ و مدل C: رینولدز
ورودی ۶۷
شکل ۶-۳۲: افت فشار در تمام غلظتها-مدلهای A,B,D: رینولدز ورودی ۴۰۴ و مدل C: رینولدز
ورودى ۴۵
شکل ۶-۳۳: افت فشار در تمام غلظتها-مدلهای A,B,D: رینولدز ورودی ۵۰۵ و مدل C: رینولدز
ورودى ۵۶
شکل ۶-۳۴: افت فشار در تمام غلظتها-مدلهای A,B,D رینولدز ورودی ۶۰۶ و مدل C: رینولدز
ورودی ۶۷

فهرست جداول

۴۰.	دول ۳-۱: مقایسه ضریب هدایت حرارتی در جامدات و سیالات
۶۷	دول ۴-۱: شرایط جریان در لوله
٧۶	دول ۴-۲: افت فشارهای به دست آمده از طریق شبیهسازی و حل تحلیلی
۸۲ .	دول ۵-۱: مشخصات صفحات خنککاری
۹۷.	دول ۶-۱: دمای میانگین جریان خروجی در تمام مدلها و تمام رینولدزها
۱۰۸	دول ۶-۲: دادههای مربوط به مدل A در رینولدز ۴۰۴
۱۰۸	دول ۶-۳: دادههای مربوط به مدل A در رینولدز ۵۰۵
۱۰۸	دول ۶-۴: دادههای مربوط به مدل A در رینولدز ۶۰۶
۱۰۸	دول ۶-۵: دادههای حاصل از حل عددی مربوط به مدل B در رینولدز ۴۰۴
۱۰۹	دول ۶-۶: دادههای حاصل از حل عددی مربوط به مدل B در رینولدز ۵۰۵
۱۰۹	دول ۶-۷: دادههای حاصل از حل عددی مربوط به مدل B در رینولدز ۶۰۵
۱۰۹	دول ۶-۸: دادههای حاصل از حل عددی مربوط به مدل C در رینولدز ۴۵
۱۰۹	دول ۶-۹: دادههای حاصل از حل عددی مربوط به مدل C در رینولدز ۵۶
۱۱۰	دول ۶-۱۰: دادههای حاصل از حل عددی مربوط به مدل C در رینولدز ۶۷
۱۱۰	دول ۶-۱۱: دادههای حاصل از حل عددی مربوط به مدل D در رینولدز ۴۰۴
۱۱۰	دول ۶-۱۲: دادههای حاصل از حل عددی مربوط به مدل D در رینولدز ۵۰۵
۱۱۰	دول ۶-۱۳: دادههای حاصل از حل عددی مربوط به مدل D در رینولدز ۶۰۶

فهرست علائم و اختصارات

A	مساحت سطح
A _{ch}	مساحت سطح مقطع كانال
Ср	ظرفیت حرارتی ویژه
D _h	قطر هيدروليكي
F	ثابت فارادى
f	ضريب اصطكاك
h	ضريب انتقال حرارت جابهجايي
i	شدت جريان الكتريكي
k	ضريب هدايت حرارتي
k ₁	ضريب افت موضعي
Le	طول ورودى هيدروديناميكي
L _{e,t}	طول ورودی گرمایی
m	جرم
ṁ	دبی جرمی
n	تعداد سلولهای پیل سوختی به ازای هر صفحه خنککاری
Nu	عدد ناسلت
p	فشار
pch	محيط كانال
Pr	عدد پرانتل
q"	شار حرارتی
Re	عدد رينولدز
S_v	تلفات ويسكوز
Т	دما
Tave	دمای متوسط
T _{max}	دمای حداکثر
T_{min}	دمای حداقل

T _m	دمای میانگین
T _{m,in}	دمای میانگین ورودی
Ts	دمای سطح
um	سرعت متوسط
Ut	شاخص يكنواختى دما
V _{Cell}	ولتاژ کاری سلول پیل سوختی
V _{tn}	ولتاژ حرارتی
\vec{V}	بردار سرعت
V _x	سرعت محورى
Vr	سرعت شعاعي
ρ	چگالی
μ	ويسكوزيته ديناميكي
φ	غلظت حجمى نانو ذرات
Υ	حجم
$\eta_{\scriptscriptstyle m max}$	بازده حداكثر
$\overline{ au}$	تانسور تنش
Ī	تانسور همانی
$\Delta G_{Reaction}$	انرژی آزاد گیبس واکنش
$\Delta H_{Reaction}$	آنتالپی واکنش
$\Delta { m h_f}^0$	آنتالپی تشکیل

زیر نویسها

f	سيال
р	نانو ذرات
nf	نانو سيال
W	آب

. فصل اوّل

پیل سوختی غثیاء پلیمری

۱–۱) مقدمه

انرژی و تبدیل آن جزء ضروری ترین موارد جهت زندگی فردی و اجتماعی ما هستند. در تمامی فعالیتهای انسانی از نفس کشیدن گرفته تا حمل و نقل، انرژی به مصرف می سد یا از صورتی به صورت دیگر تبدیل می شود. میزان رفاه اجتماعی یک ملّت به میزان مصرف انرژی آن مردم بستگی دارد. در حال حاضر بیش از ۸۵ درصد انرژی مورد نیاز مردم زمین از سوختهای فسیلی تأمین می گردد. انرژی بیشتر این سوختهای فسیلی از طریق فرآیند احتراق آزاد می شود که این فرآیند حتی در بهترین حالت خود آلودگی زیادی تولید می کند. محققان زمان اتمام نفت، زغال سنگ و گاز موجود در کره زمین را به ترتیب ۲۵، ۱۰۷ و ۳۷ سال تخمین میزنند [۱]. از سوی دیگر استفاده از سوختهای فسیلی در سطح وسیع، پیامدهای ناگوار زیست محیطی از جمله اثر گلخانهای را به دنبال دارد [۲]. آلودگیهای زیست محیطی و ذخایر اندک باقیمانده سوختهای فسیلی، ما را بر آن می دارد تا به دنبال منبع جدیدی برای

در سالهای اخیر پیل سوختی غشاء پلیمری^۱ به عنوان منبع پاک و پربازده انرژی مورد توجه فراوانی قرار گرفته است. پیل سوختی دستگاهی است که انرژی شیمیایی موجود در سوخت را مستقیماً به الکتریسیته تبدیل می کند. این دستگاه با ترکیب سوخت و اکسیژن و بدون انجام احتراق، الکتریسیته

¹ Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell (PEMFC)

تولید می کند. هنگامی که هیدروژن به عنوان سوخت استفاده شود، آب و گرما، تنها محصولات واکنش هستند [۳]. شکل (۱–۱) مفهوم عمومی یک پیل سوختی که با هیدروژن کار می کند را نشان می دهد.



شکل ۱-۱: مفهوم عمومی یک پیل سوختی هیدروژن- اکسیژن[۴]

مشابه یک باتری، در پیل سوختی تولید الکتریسیته در خلال واکنشهای الکتروشیمیایی صورت می گیرد با این تفاوت که در پیل سوختی، واکنش دهنده ها از منبع خارجی تأمین می شوند [۵]. برخلاف یک باتری که در واقع انرژی شیمیایی ذخیره شده را آزاد می کند، پیل سوختی به عنوان یک منبع پیوسته عمل کرده و تا هنگامی که سوخت آن تأمین شود انرژی شیمیایی را به انرژی الکتریکی تبدیل می کند [۱].

پیلهای سوختی از منظرهای مختلف دستهبندی میشوند. دستهبندی بسیار معمول بر مبنای نوع الکترولیت میباشد و پیلهای سوختی از این منظر به پنج گروه کلی: پیل سوختی اسید فسفریک^۱، پیل سوختی آلکالین^۲، پیل سوختی کربنات مذاب^۳، پیل سوختی اکسید جامد^۴ و پیل سوختی غشاء پلیمری تقسیمبندی میشوند. در میان انواع پیلهای سوختی، پیل سوختی غشاء پلیمری و پیل سوختی اکسید

¹ Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC)

^r Alkaline Fuel Cell (AFC)

^{*} Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC)

^{*} Solid Oxide Fuel Cell (SOFC)

جامد به دلیل مزایا و کاربردهای بیشتر در موقعیت برتری قرار دارند و در فناوریهای اخیر بیشتر مورد استفاده قرار گرفتهاند.

تاریخچه پیلهای سوختی به اوایل قرن نوزدهم برمی گردد. در آن زمان قاضی و دانشمند انگلیسی، ویلیام گرو^۱، در حال تحقیق بر روی عمل الکترولیز آب بود. آزمایشهای او در سال ۱۸۳۹ میلادی بر روی الکترولیز آب منجر به ایدهی ساختن وسیلهای شد که بعدها پیل سوختی نامیده شد. گرو معتقد بود که میتوان پدیدهی الکترولیز آب را برعکس کرد و از واکنش شیمیایی هیدروژن و اکسیژن، الکتریسیته تولید کرد [۴]. در راه پیشرفت این وسیله دانشمندان متعددی تلاش کردند و تقریباً ۱۵۰ سال پس از آزمایشهای اولیه گرو، پیل سوختی کاربرد صنعتی پیدا کرد.

امروزه پیلهای سوختی کاربردهای گوناگونی داشته و قابلیت استفاده در مصارف حمل و نقل، منابع انرژی قابل حمل و منابع انرژی ساکن را دارند. این تجهیزات یکی از وسایلی هستند که امید میرود جایگزین موتورهای احتراق داخلی شوند. کمپانیهای بزرگ اتومبیلسازی جهان، بر این عقیده هستند که خودروهایی با موتور پیل سوختی به سرعت توسعه خواهند یافت. مطالعات نشان میدهند در سال ۲۰۵۰ میلادی، وسایل حمل و نقل با موتور پیل سوختی، بیشترین کاهش را در آلودگی و مصرف سوختهای فسیلی سبب خواهند شد [۶]. برخلاف موتورهای احتراقی که انرژی شیمیایی را پس از تبدیل آن به حرارت به شکل دلخواه تبدیل میکنند، پیلهای سوختی در فرآیند تبدیل انرژی خود در

[\]William Grove

الکتریکی در پیلهای سوختی یکی از مزایای بزرگ آنها میباشد [۹, ۷, ۸]. با توجه به ویژگیهای پیلهای سوختی غشاء پلیمری میتوان این وسایل را یکی از نامزدهای وسایل تولید انرژی در آینده معرفی کرد. از جمله این ویژگیها میتوان به بازدهی بالا، چگالی قدرت زیاد و حجم کم، زمان راهاندازی و توقف کوتاه، دمای کاری پایین، آلودگی نزدیک به صفر در زمان کارکرد، سیستم نسبتاً ساده، کارکرد بدون صدا، عدم وجود قطعه متحرک و درنتیجه قابلیت اطمینان بالا، پاسخ سریع به تغییرات توان درخواستی و ایمنی بالا اشاره کرد. از سوی دیگر این وسایل دارای معایبی چون قیمت بالا و عمر نسبتاً کوتاه هستند که مانعی در راه پیشرفت سریع آنها میباشد [۹–۱۶]. همان طور که بیان شد، پیلهای سوختی دمای کاری پایینی دارند. در حقیقت به منظور کارکرد

هیچ مرحلهای انرژی را به حرارت تبدیل نمیکنند. تبدیل مستقیم انرژی شیمیایی سوخت به انرژی

مهم در عملکرد پیل سوختی غشاء پلیمری است که تأثیرات مستقیم یا غیر مستقیم بر سینتیک واکنش، انتقال آب، سطح رطوبت، رسانایی غشاء پلیمری، میزان تحمل لایه کاتالیست، دفع گرما، تنشهای حرارتی در غشاء و مواردی از این دست دارد. با بالا رفتن دما، نرخ انجام واکنشهای الکتروشیمیایی و سرعت انتقال پروتونها در غشاء پلیمری افزایش مییابد که این موارد افزایش ولتاژ و توان خروجی پیل را در پی دارد؛ البته افزایش بیش از حد دما، میتواند باعث آسیب دیدن غشاء پلیمری گردد. کاهش بیش از حد دما باعث کم شدن سرعت انجام واکنشهای شیمیایی در پیل سوختی شده و کاهش عملکرد این وسیله را به دنبال دارد [۱۷].

۱-۲) طول عمر و هزینه پیل سوختی غشاء پلیمری

با وجود پیشرفتهای زیادی که در زمینه تکنولوژی پیل سوختی صورت گرفته است، برخی موانع روند سریع تجاری شدن این تکنولوژی در مقیاس وسیع را تحت تأثیر قرار داده است. از میان این موانع میتوان به هزینه بالا و طول عمر نسبتاً پایین این وسایل اشاره کرد [۱۸]. همواره این علاقه وجود دارد که وسایل صنعتی دارای دوام و عمر بالا و هزینه پایینی باشند. پیلهای سوختی غشاء پلیمری نیز از این قضیه مستثنی نیستند. میزان عمر یک پیل سوختی کمیت پیچیدهای است که به فعل و انفعالات شیمیایی و مکانیکی پیل بستگی دارد. چن و دستیاران[۱۹] در مقالهای به ارزیابی طول عمر پیل سوختی غشاء پلیمری پرداخته و رابطهای برای محاسبه طول عمر آن ارائه کردهاند. این فرمول بر اساس اطلاعات مربوط به وسایل نقلیه و دادههای آزمایشگاهی میباشد.

در سیستمهای پیل سوختی خرابی ممکن است به صورتهای گوناگونی ایجاد شود که یکی از شایعترین آنها واماندگی^۱ غشاء پلیمری و در نتیجه کاهش ولتاژ خروجی پیل میباشد. وقتی یک پیل سوختی کار میکند، دما و میزان رطوبت در قسمتهای مختلف آن متفاوت است. همچنین مقدار ضریب

^{&#}x27; Failure

انبساط حرارتی اجزای مختلف پیل یکسان نیست که این موضوع باعث می شود پیل تحت تنش قرار گیرد. از سوی دیگر اگر دما در پیل به درستی کنترل نگردد ممکن است با ایجاد نقاط داغ^۱، غشاء یلیمری آسیب ببیند [۲۱, ۲۱]

میزان جابهجایی، تغییر شکل و تنشی که بر اثر تغییر دما و تغییر رطوبت در شرایط کارکرد واقعی در پیل ایجاد میشود توسط بغدادی[۲۲] مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان میدهند که وجود گرادیان دما در پیل، توزیع نامتقارن تنش و ایجاد تنش خمشی را به دنبال دارد که این مسأله میتواند باعث جابهجایی و لغزش بین اجزای پیل و حتی ایجاد ترک و سوراخ در آنها شود.

همان طور که بیان شد به دلیل هزینه نسبتاً بالایی که پیلهای سوختی دارند، استفاده از آنها کاملاً فراگیر نشده است. این هزینه به صورت مبلغ صرف شده به ازای ظرفیت تولید توان تعریف شده و اغلب بر حسب دلار بر کیلووات محاسبه می شود. به عنوان نمونه وقتی یک پیل سوختی غشاء پلیمری در یک وسیله حمل و نقل نظیر خودرو استفاده می شود، زمان سرویس آن کمتر از ۳۰۰۰ ساعت و هزینه آن بالغ بر ۵۰ دلار در هر کیلووات است [۱۹]. از این رو در حال حاضر این وسیله از لحاظ اقتصادی توان رقابت با موتورهای احتراق داخلی را ندارد؛ زیرا موتورهای احتراق داخلی از نظر صنعتی به بلوغ رسیده اند و هزینه کمی دارند. استفاده از فلز گران بهای پلاتینیوم در لایه کاتالیست، قیمت بالای غشاء پلیمری، هزینه بر بودن تولید و ذخیره سازی هیدروژن و خرابی زودرس به دلیل خنک کاری ناصحیح از دلایل

فصل اول

^{&#}x27; Hot Spot

هزینه بالای پیل سوختی هستند [۲۳]. در سالهای اخیر پیشرفتهای چشمگیری در زمینه افزایش طول عمر و کاهش هزینههای پیل سوختی انجام گرفته است و این وسیله راه پیشرفت خود به سوی تجاری شدن را به سرعت می پیماید [۲۴]. هزینه پیل سوختی غشاء پلیمری در سال ۲۰۰۲ میلادی به طور معمول ۲۷۵ دلار بر کیلووات بوده است که این هزینه به ۷۳ دلار بر کیلووات در سال ۲۰۰۸ کاهش یافته و در سال ۲۰۰۹ میلادی با ۳۵ درصد کاهش نسبت به سال ۲۰۰۸ به ۶۱ دلار بر کیلووات رسید [۷, ۱۹].

همانطور که بیان شد، یکی از دلایل هزینهبر بودن استفاده از پیلهای سوختی غشاء پلیمری، آسیب دیدن غشاء در اثر خنککاری نامطلوب پیل و همچنین هزینه ناشی از کارکرد سیستم خنککاری است؛ بنابراین در صورت بهبود سیستم خنککاری پیل سوختی، یکی از چالشهای موجود در زمینه تجاری شدن این وسایل از میان خواهد رفت.

۱-۳) اجزای پیل سوختی غشاء پلیمری

شماتیکی از قطعات پیل سوختی غشاء پلیمری در شکل (۱-۲) نشان داده شده است. به طور کلی هر سلول پیل سوختی غشاء پلیمری شامل اجزای زیر است [۵]. غشاء ایا غشاء تبادل پروتون ، لایه های پخش گاز ۳ در دو طرف آند و کاتد، لایه های کاتالیست ،

صفحات قطبی⁶.



شکل ۱-۲: شماتیک اجزای پیل سوختی [۳]

۱-۳-۱) غشاء

در پیلهای سوختی غشاء پلیمری، الکترودهای کاتد و آند توسط غشائی از یکدیگر جدا شدهاند. این غشاء در برابر انتقال گازهای واکنشدهنده و الکترونها عایق بوده؛ اما هادی خوب پروتون میباشد [۲۳]. غشاء، پیچیدهترین و حساسترین جزء یک پیل سوختی غشا پلیمری است؛ زیرا خواص و مشخصات آن مستقیماً بر عملکرد پیل تأثیر میگذارد. غشاء در هسته پیل قرار دارد و آند را از کاتد جدا

مى كند. يك غشاء خوب بايد داراى خواصى چون رسانايى يونى بالا، عايق الكترونى خوب، پايدارى

٩

^a Polar Plates

[\] Membrane

^r Proton Exchange Membrane

[&]quot; Gas Diffusion Layers

^{*} Catalyst Layers

حرارتی و شیمیایی بالا و هزینه پایین ساخت باشد. از جمله مواد معمول مورد استفاده برای ساخت غشاء، نافیون^۱ میباشد. نافیون یک ماده پلیمری است که ساختار اصلی آن مستحکم و شبیه به تفلون میباشد [۴].

۱-۳-۲) لایه کاتالیست

واکنشهای الکتروشیمیایی در پیل سوختی غشاء پلیمری فقط در لایه کاتالیست اتفاق میافتند. در این پیلها به دلیل دمای عملکرد پایین پیل، جهت افزایش نرخ واکنشهای شیمیایی، نیاز به کاتالیست میباشد. لایه کاتالیست در تماس مستقیم با غشاء و لایه پخش گاز قرار دارد. لایه کاتالیست به همراه چسبهایی که آن را به لایههای مجاور می چسباند، الکترودها را شکل می دهد. لایه کاتالیست از جنس پلاتینیوم و یا آلیاژهای این فلز ساخته می شود. واکنش شیمیایی که در سمت کاتد اتفاق میافتد، از نظر سینتیکی، حدود ۴ تا ۶ برابر از واکنشی که در سمت آند انجام می شود آرام تر است؛ با این حال، پلاتینیوم کاتالیست رایج برای پیلهای سوختی غشاء پلیمری در هر دو سمت آند و کاتد می باشد [۴,

[\] Nafion

فصل اول

۱-۳-۳) لایه پخش گاز

لایه پخش گاز از موادی ساخته می شود که جنس پایه آن ها فیبر کربن است. این قسمت باید گازهای واکنش و الکترون ها را به طور مناسب انتقال داده و پخش کند. همچنین آب تولید شده در واکنش را منتقل کرده و دفع نماید [۲۵].

الکترودهای پخش گاز به کار برده میشوند تا گازهای واکنشگر بتوانند از میان نواحی متخلخل آنها به سمت لایه کاتالیست، عبور کنند. در شرایط مختلف عملکرد پیل، آب به شکل مایع درون پیل وجود دارد. آب تولید شده در پیل باید به بیرون پیل هدایت شود، زیرا اگر آب در محل انجام واکنش تجمع یابد، سبب بروز محدودیت انتقال جرم برای گازهای واکنشگر میشود. برای ممانعت از بروز این پدیده باید دمای داخل پیل به درستی کنترل شده و همچنین ساختار لایه پخش گاز آبگریز باشد. معمولاً لایههای پخش گاز کاتد و آند هر دو با تفلون آبگریز میشوند [۴].

۱-۳-۴) صفحات قطبی

صفحات جمع کننده جریان (صفحات قطبی یا صفحات دوقطبی) چندین وظیفه در توده پیل سوختی دارند. معمولاً این صفحات بین تک پیلهای مختلف تماس الکتریکی ایجاد می کنند، بنابراین باید هدایت الکتریکی بالایی داشته باشند. صفحات قطبی برای توده پیل پشتیبان ساختاری ایجاد می کنند، لذا باید استحکام کافی داشته باشند. همچنین لازم است این صفحات هدایت حرارتی خوبی داشته باشند تا گرما را از پیل منتقل کنند. جمع کنندههای جریان عموماً از گرافیت، فلزاتی از قبیل استنلس استیل و آلومینیم یا مواد کامپوزیتی ساخته میشوند [۴]. کانالهای جریان گاز در صفحات جمع کننده جریان قرار داشته و وظیفه توزیع یکنواخت سوخت و هوا را بر عهده دارند.

۱-۳-۵) صفحات خنککاری

یک روش برای خنک کاری توده پیل بدین صورت است که کانال هایی برای عبور سیال خنک کننده در صفحات دوقطبی ایجاد می کنند. در روش دیگر که معمولاً در پیل هایی با توان بالا استفاده می شود، بین تک پیل ها صفحاتی جهت خنک کاری قرار می دهند. این صفحات از موادی که ضریب هدایت حرارتی بالایی دارند نظیر گرافیت ساخته می شود. در میان این صفحات خنک کاری کانال هایی جهت عبور جریان سیال خنک کننده تعبیه می گردد. ایجاد این کانال ها به خصوص در صفحات گرافیتی با ابعاد بزرگ، کار مشکلی است و در عمل در یک طرف صفحات خنک کاری، یک نیمه از این کانال ها ایجاد شده و با به هم چسباندن دو نیم صفحه، کانال های عبور سیال خنک کننده تشکیل می شود. برای کاهش تعداد صفحات خنک کاری، صرفه جویی در هزینه و کاهش اندازه پیل، می توان بیش از یک تک پیل را بین هر دو صفحه خنک کاری قرار داد. ممکن است بین هر صفحه خنک کاری، تعداد یک، سه و یا پنچ عدد تک پیل سری قرار گیرد [۱].

فصل اول

طراحی کلاسیک صفحات خنککاری بسیار ساده بوده و به صورت کانالهای مستقیم و موازی در یک صفحه می باشد که آب به صورت آرام در آن جریان دارد [۲۶]. ساختار کانال های جریان خنک کاری (نوع کانالها، اندازه عمق کانال و ...) از مهمترین فاکتورهایی است که بر خنککاری توده پیل تأثیر مي گذارد. شبكه توزيع جريان سيال خنك كننده بايد داراي سه مشخصه بارز باشد. مشخصه اول اين است که دفع حرارت تولیدی در توده پیل سوختی در ولتاژهای کاری متفاوت انجام پذیرد. با کاهش ولتاژ كارى توده پيل، حرارت توليدى پيل افزايش مىيابد. بنابراين شبكه توزيع جريان سيال خنككن باید به گونهای طراحی شود که در دامنه وسیعی از ولتاژها، حرارت تولیدی را دفع کرده و دمای توده پیل را در دمای کاری ثابت نگه دارد. مشخصه دوم شبکه خنک کاری کمینه بودن افت فشار سیال خنک کننده از ورودی تا خروجی آن میباشد. مشخصه سوم این شبکه ایجاد توزیع دمای یکنواخت در توده پیل سوختی است. از آنجایی که سرعت انجام واکنش در توده پیل سوختی و همچنین چگالی جریان در ولتاژ کاری به دما وابسته است، بنابراین باید توزیع یکنواخت دما در سطح توده پیل سوختی برقرار باشد تا چگالی جریان نیز یکنواخت باشد. هر چند که با توجه به اصول انتقال حرارت، ایجاد توزیع کاملاً یکنواخت دما در یک سیستم امکان پذیر نیست [۴]. در همین راستا و در جهت رسیدن به توزیع دمای یکنواخت در پیل، طرحهای مختلفی جهت شبکه خنککاری توسط محققان مختلف ارائه گردیده است.

فصل اول

۱–۴) توده پیل سوختی غشاء پلیمری

با استفاده از علم ترمودینامیک، اثبات میشود یک پیل سوختی که با هیدروژن کار می کند، در حالت بازگشت پذیر می تواند حداکثر ۱/۲۲۹ ولت الکتریسیته تولید کند؛ اما به دلیل وجود بازگشت ناپذیری ها، این ولتاژ در عمل قابل دستیابی نبوده و ولتاژ یک تک پیل می تواند به طور نوعی بین ۱/۶ تا ۱/۸ ولت و چگالی جریان آن حدود ۴/۰ تا ۱/۸ آمپر بر سانتیمتر مربع باشد. به همین دلیل و برای رسیدن به توان الکتریکی مورد نظر، چند پیل را به صورت سری به یکدیگر متصل می کنند. به این مجموعه از پیل های سوختی، توده پیل سوختی ^۱ می گویند. جهت طراحی توده پیل سوختی از ساختارهای متفاوتی استفاده می کنند. متداول ترین حالت، ساختار ساندویچی می باشد. در این ساختار، صفحات دوقطبی در دو طرف هر تک پیل قرار می گیرد. طراحی این صفحات به صورتی است که کانال های توزیع سوخت یک پیل در یک طرف آن و در سمت دیگر کانال های هوای پیل مجاور قرار دارد [۸, ۲۳].

۱-۵) نحوه عملکرد پیل سوختی غشاء پلیمری

همان طور که بیان شد، پیل سوختی دستگاهی است که با ترکیب سوخت و اکسید کننده و بدون انجام فرآیند احتراق، الکتریسیته تولید می کند. هر مادهای که بتواند به طور پیوسته تأمین شده و در واکنش اکسیداسیون^۲ شرکت کند، این قابلیت را دارد که به عنوان سوخت در پیل سوختی استفاده

^{&#}x27; Fuel Cell Stack

^r Oxidation

گردد. به طور مشابه، هر سیالی که بتواند با نرخ مناسب در واکنش شیمیایی احیا^۱ شرکت کند، می تواند به عنوان اکسید کننده در پیل سوختی انتخاب شود. در اکثر موارد هیدروژن، گزینه خوبی به عنوان سوخت در پیل سوختی غشاء پلیمری می باشد؛ زیرا این ماده در حضور کاتالیزور مناسب دارای واکنش پذیری بالا و چگالی انرژی مناسبی است. در کاربردهای عملی، ماده اکسید کننده که در سمت کاتد استفاده می شود اکسیژن می باشد [۵]. جهت جلوگیری از خشک شدن غشاء پلیمری، جریان های گاز ورودی به پیل سوختی باید مرطوب باشند. جهت نیل به این هدف، قبل از ورود گازها به پیل، آن ها را از میان آبی که دمای آن کمی کمتر از دمای کاری پیل سوختی است می گذرانند [۲۳].

شکل (۱–۳) نحوه عملکرد پیل سوختی غشاء پلیمری را نشان میدهد. سوخت و هوای مرطوب به کانالهای گاز وارد میشوند و از طریق فرآیند نفوذ^۲ در لایه پخش گاز به لایه کاتالیست میرسند. در سطح مشترک لایه کاتالیست و غشاء پلیمری و در هر دو سمت غشاء، نصف واکنش کلی پیل اتفاق میافتد. در سمت آند، واکنش اکسیداسیون (معادله (۱–۱)) و در سمت کاتد واکنش احیا (معادله (۱– ۲)) انجام می شود.

در آند، گاز هیدروژن به پروتون و الکترون تجزیه می شود. این واکنش کمی گرماگیر است. غشاء پلیمری به عنوان یک الکترولیت عمل کرده و فقط به پروتون ها اجازه عبور می دهد بنابراین پروتون های

[\]Reduction

^r Diffusion



شكل ۱-۳: نحوه عملكرد پيل سوختى غشاء پليمرى [۱]

حاصل از طریق غشاء پلیمری و الکترونها از راه مدار الکتریکی خارجی به سمت کاتد حرکت میکنند. اختلاف ولتاژ بین الکترودها نیروی لازم جهت انتقال پروتون را ایجاد میکند. در کاتد پروتونها و الکترونها با اکسیژن ترکیب شده و آب و حرارت تولید میشود. این واکنش به شدت گرمازاست. واکنش کلی صورت گرفته در پیل سوختی طبق معادله (۱–۳) قابل بیان است [۱].

$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$$
 واکنش آند (۱-۱)

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$$
 واكنش كلى (٣-١)

آب تولید شده در پیل سوختی توسط جریان خروجی کاتد به بیرون از پیل برده شده و عموماً به

اتمسفر تخليه مي گردد.

فصل اول

مکانیزمی که در قسمت بالا بیان شد، راهی است که ما را قادر می سازد انرژی شیمیایی موجود در هیدروژن را به طور مستقیم به الکتریسیته تبدیل کنیم. به این فرآیند، احتراق سرد هیدروژن ^۱ می گویند؛ زیرا حتی در دمای اتاق قابل انجام شدن است. برخلاف این فرآیند و در غیاب کاتالیزور، واکنش احتراق مستقیم هیدروژن نیاز به انرژی فعال سازی بالایی دارد و این یعنی دما در آن بسیار بالا میباشد. از این رو به واکنش سوختن هیدروژن، احتراق گرم هیدروژن^۲ می گویند [۱, ۴].

۱-۶) بازده پیل سوختی غشاء پلیمری

با استفاده از ترمودینامیک واکنش شیمیایی در پیل سوختی، بازده پیل به صورت زیر به دست میآید.

$$\eta_{\max} = \frac{\Delta G_{reaction}}{\Delta H_{reaction}} \tag{(f-1)}$$

در این معادله ΔG_{Reaction} حداکثر کاری است که با استفاده از قانون اول ترمودینامیک و ΔH_{Reaction} در این معادله رایت که با استفاده از قانون دوم ترمودینامیک قابل دستیابی میباشد. از طریق رابطه بالا، حداکثر کاری است که با استفاده از قانون دوم ترمودینامیک قابل دستیابی میباشد. از طریق رابطه بالا، در دمای اتاق حداکثر بازده یک پیل سوختی حدود ۸۳ درصد به دست میآید [۳۳]. در شرایط واقعی عملکرد، حداکثر بازده پیل سوختی غشاء پلیمری حدود ۴۰ درصد است.

¹ Cold Combustion of Hydrogen

 $^{{}^{\}scriptscriptstyle \Upsilon}$ Hot Combustion of Hydrogen
فصل دوم

جنك كارى پيل سوختى غشاء پليمرى

۲-۱) تولید حرارت در پیل سوختی غشاء پلیمری

مل دوم

حرارت تولید شده در پیل سوختی غشاء پلیمری، ناشی از چهار عامل است. این عوامل گرمای آنتروپی واکنشها^۱، بازگشتناپذیریهای واکنشهای الکتروشیمیایی^۲، مقاومتهای اهمی^۳ و چگالش آب^۴ هستند. گرمای آنتروپی، در واقع تغییر آنتروپی در واکنشهای الکتروشیمیایی است. بازگشتناپذیریهای ناشی از واکنشهای الکتروشیمیایی، مربوط به اضافه پتانسیل^۵ در کاتد و آند میباشد که باعث تولید حرارت زیادی میشود. به دلیل این که واکنش کلی در پیل سوختی به صورت دو نیم واکنش در دو الکترود انجام میشود. اضافه بار و تغییر آنتروپی در دو الکترود یکسان نبوده و حرارت تولید شده در سمت کاتد بیشتر است. گرمای ناشی از مقاومت اهمی به دلیل مقاومت در مقابل انتقال الکترونها و پروتونها میباشد. به دلیل تغییر فاز مقدار اندکی آب در پیل سوختی، گرمای ناشی از چگالش آب مقدار قابل توجهی نیست [۲۷–۲۹].

به منظور کسب اطلاعات کلی در خصوص میزان حرارت تولیدی و در نتیجه خنککاری مورد نیاز در یک مجموعه پیل سوختی، میتوان حرارت تولید شده در یک تک پیل را به وسیله رابطه زیر محاسبه

كرد.

¹ Entropic Heat Of Reactions

^r Irreversibilities Of The Electrochemical Reactions

^{*} Ohmic Resistances

^{*} Water Condensation

 $^{^{\}scriptscriptstyle \Delta}$ Overpotential

$$q'' = (V_{tn} - V_{cell}) \times i \tag{1-7}$$

واكنش، تبديل به الكتريسيته شود. V_{cell} ولتاژ كارى و i شدت جريان به واحد سطح پيل مىباشد.

شکل (۲-۱) حرارت و توان تولیدی را در شدت جریانهای متفاوت بر واحد سطح نشان میدهد.



با توجه به حالت آب در محصولات (مایع یا بخار)، میتوان مقادیر مختلفی برای Vtn محاسبه کرد.

البته در بسیاری از موارد و برای سادگی، محاسبات با این فرض انجام می شود که تمام آب به صورت

بخار است.

صل دوم

¹ Thermal Voltage

^r Operating Voltage

خنك كارى پىل يوختى غثياء يلىمرى

در شرایط کارکرد دائم، شار حرارتی متوسط که به صفحه خنککاری وارد می شود به صورت ساده از رابطه زیر قابل محاسبه است [۳۲, ۳۲].

$$q'' = \frac{ni\left(-\Delta h_{f}^{0}/2F - V_{Cell}\right)}{2A} \tag{1-7}$$

در این رابطه n تعداد تک سلها به ازای یک صفحه خنککاری، i جریان تک پیل، V ولتاژ خروجی A میاشد. پیل، Δh_f^0 آنتالپی تشکیل آب و F ثابت فارادی و برابر ۹۶۴۷۸ کولن بر مول میباشد.

۲-۲) مدیریت گرما در پیل سوختی غشاء پلیمری

صل دوم

یک سیستم پیل سوختی معمولاً به همان اندازه یا کمی بیشتر که الکتریسیته تولید میکند گرما هم تولید میکند؛ بنابراین گرمای اضافه باید از پیل خارج گردد تا دمای آن کنترل شود. از میان پارامترهایی که بر عملکرد پیل سوختی غشاء پلیمری تأثیر میگذارند، پارامتر دما در سطح غشاء بسیار مهم است. در این پیلها، دما باید در بازه معینی نگه داشته شود؛ زیرا پدیدههای مختلفی چون سینتیک و نرخ واکنشهای الکتروشیمیایی، چگالش و نفوذ آب، نرخ تبخیر آب، شرایط و عمر غشاء و پدیده انتقال گاز در محیطهای متخلخل، شدیداً به دما وابسته هستند. هر کدام از این موارد بر عملکرد یا عمر مفید پیل تأثیر میگذارند [۱۶]. منظور از مدیریت صحیح گرما در پیل سوختی غشاء پلیمری، نگه داشتن دمای کارکرد پیل در بازه دمایی مناسب و تلاش جهت یکنواخت کردن توزیع دما میباشد. این کار از طریق دفع صحیح و برنامهریزی شده گرمای تولید شده در پیل میسر می گردد.

ل دوم

در پیلهای سوختی غشاء پلیمری، دما باید به اندازه کافی بالا باشد تا اطمینان حاصل شود که واکنشهای الکتروشیمیایی به خوبی انجام میشوند. با بالاتر بودن دما، نرخ انجام واکنشهای الکتروشیمیایی افزایش یافته و توان خروجی پیل بالا میرود. از سوی دیگر دما باید به اندازه کافی پایین باشد تا باعث خرابی غشاء نگردد. بالا رفتن بیش از حد دما، خشکشدگی غشاء را به دنبال دارد. در صورتی که خشکشدگی الکترولیت به صورت کلی ایجاد شود، آنگاه ولتاژ خروجی پیل و در نتیجه راندمان آن کاهش مییابد؛ اما در صورتی که این خشکشدگی به صورت موضعی رخ دهد، مقاومت الكتروليت در ناحيه خشكشده افزايش پيدا ميكند. اين افزايش مقاومت، توليد گرماي بيشتر در آن ناحیه را به دنبال دارد و این گرما مجدداً باعث خشک شدن بیشتر الکترولیت در آن ناحیه می شود. این فرآیند به طور کنترل نشدهای تکرار شده تا این که نقاط داغی بر روی مجموعه غشاء الکترود تشکیل شود. این نقاط داغ، هستههای اولیه سوختن غشاء و تخریب پیل را تشکیل میدهند [۲۶, ۳۳]. همانطور که بیان شد، به منظور انجام بهینه واکنشهای الکتروشیمیایی در سراسر پیل و در نتیجه

رسیدن به حداکثر بازده، لازم است توزیع دما در پیل یکنواخت بوده و معمولاً در بازه ۶۰ تا ۸۰ درجه سلسیوس باشد. توزیع غیر یکنواخت دما، عمر و قابلیت اطمینان به غشاء را کاهش میدهد. غیر یکنواخت بودن توزیع دما، میتواند باعث به وجود آمدن نقاط داغ در پیل و آسیب دیدن غشاء گردد [۳۴]. یکسان بودن توزیع دما در پیل باعث میشود نرخ انجام واکنشهای الکتروشیمیایی و تبدیل انرژی در سطح غشاء یکنواخت باشد.

صل دوم

همان طور که بیان شد، در اثر انجام واکنش الکتروشیمیایی در داخل پیل سوختی غشاء پلیمری، آب تولید می شود. این آب در دماهای متفاوت می تواند به حالت مایع یا گاز وجود داشته باشد. از این رو کاهش یا افزایش بیش از حد دما می تواند باعث بروز مشکلات کم آبی و یا تجمع آب در پیل گردد؛ بنابراین مدیریت صحیح آب در پیل سوختی غشاء پلیمری در گرو مدیریت صحیح گرما در آن می باشد [۳۴]. مدیریت ناصحیح آب موجود در پیل باعث کاهش شدید کارایی آن خواهد شد. با بالا رفتن دما و خشک شدن غشاء، توانایی آن در انتقال پروتون ها کاهش می یابد. شکل (۲-۲) میزان رسانایی غشاء بر حسب محتوای آب موجود در آن را نشان می دهد.



از سوی دیگر با کاهش دما، آب مایع در پیل تجمع یافته و باعث بسته شدن منافذ لایه پخش گاز و مانع از رسیدن اکسیژن به لایه کاتالیست میشود. همچنین آب مایع میتواند باعث پر شدن منافذ محیط متخلخل لایه کاتالیست شده و سطح مؤثر آن را کاهش دهد؛ بنابراین پدیده تجمع آب مایع در پیل سوختی، عملکرد پیل را کاهش میدهد. شکل (۳–۲)، اثر نامطلوب پدیده تجمع آب^۱ را بر عملکرد پیل سوختی غشاء پلیمری نشان میدهد. همانطور که در این شکل مشخص است، با افزایش تجمع

آب مایع در پیل، عملکرد آن کاهش مییابد.

ىل دوم



۲-۳) روشهای خنککاری پیل سوختی غشاء پلیمری و مروری بر تحقیقات پیشین

به منظور عملکرد ایمن و پربازده پیلهای سوختی غشاء پلیمری با توان بالا، عمل خنککاری از

اهمیت ویژهای برخوردار است. بازه دمایی کاری محدود پیل و اختلاف دمای نسبتاً پایین بین پیل

' Flooding

سوختی غشاء پلیمری و محیط، از جمله چالشهایی است که در هنگام طراحی سیستم خنککاری با آن مواجه میشویم. به علاوه، دفع گرما توسط جریان خروجی واکنش دهندهها و محصولات تقریباً قابل چشم پوشی است و این یعنی تمامی گرمای تولید شده باید توسط سیستم خنککاری دفع گردد. اگرچه پیلهای سوختی غشاء پلیمری دارای بازده بالایی هستند؛ اما بازهم در ازای تولید الکتریسیته مقدار قابل توجهی حرارت تولید میکنند که در خودروها این مقدار گاهی از ۱۰۰ کیلو وات هم تجاوز میکند. برای خنککاری پیل سوختی غشاء پلیمری دارای بازده بالایی هستند؛ اما بازهم در ازای تولید الکتریسیته مقدار قابل توجهی حرارت تولید میکنند که در خودروها این مقدار گاهی از ۱۰۰ کیلو وات هم تجاوز میکند. برای خنککاری پیل سوختی غشاء پلیمری از روشهای مختلفی استفاده میشود که از میان آنها میتوان به خنککاری توسط پخش کنندههای گرما^۱ (استفاده از موادی با ضریب انتقال حرارت بالا و یا لولههای انتقال گرما^۲)، خنککاری توسط جریان هوا، خنککاری با مایع و خنککاری همراه با تغییر فاز (جوشش یا تبخیر) اشاره کرد. انتخاب روش خنککاری در پیلهای سوختی غشاء پلیمری بستگی به مواردی چون توان تولیدی پیل، پیچیدگی روش و هزینه دارد.

بسته به نوع روش انتخاب شده برای خنک کاری، این سیستمها ممکن است تا ۱۰ درصد توان تولید شده توسط پیل را به مصرف برسانند [۳۴]. در بخش آتی، هر روش خنک کاری به طور خلاصه توضیح داده شده و تعدادی از مطالعات صورت گرفته در هر زمینه معرفی خواهد شد.

[\] Heat Spreaders

^{*} Heat Pipes



۲-۲-۱) خنککاری توسط پخشکنندههای حرارت

این روش خنککاری که به خنککاری لبهای نیز معروف است بر پایه انتقال حرارت از نواحی مرکزی پیل به لبهها استوار است. حرارتی که به لبههای پیل منتقل میشود توسط مکانیزم جابهجایی آزاد وارد محیط می گردد. جهت انتقال حرارت از نواحی مرکزی به لبهها از موادی با ضریب هدایت حرارتی بسیار بالا و یا لولههای انتقال حرارت استفاده می شود. این روش بی نیاز از سیال خنک کننده و پمپ می باشد و استفاده از آن باعث کاهش وزن پیل و سادگی آن خواهد شد. فلاکیگر و همکاران [۳۶] یک پیل سوختی غشاء پلیمری با توان ۵۰۰ وات و صفحات خنک کننده گرافیتی را بررسی و مدلی برای آنالیز حرارتی و بهینهسازی طراحی پیل ارائه کردند. ون و دستیاران[۱۳, ۳۴, ۳۷] در چند مطالعه آزمایشگاهی به بررسی تأثیر استفاده از نوع خاصی از گرافیت به عنوان صفحه خنک کننده پرداختند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از این ماده باعث کاهش دمای حداکثر و افزایش یکنواختی دما می شود. بر ک[۳۸] به طور تحلیلی امکان استفاده از این روش را در پیلهایی با چگالی قدرت کمتر از ۰/۳ وات بر مترمربع و با این شرط که تغییرات دمای پیل در زمان کارکرد کمتر از ۳ درجه سلسیوس باشد بررسی کرده و به این نتیجه رسیده است که در صورت استفاده از موادی با ضریب هدایت حرارتی بالاتر از W/mK و برای پیلهای کوچک با ابعاد کمتر از ۱۰ سانتیمتر شرط فوق ارضاء می شود.

^{&#}x27;Edge Cooling

استفاده از لولههای انتقال حرارت کمتر متداول است. مشکل اصلی این روش، جانمایی لولهها در داخلی پیل میباشد. وسیلیو و دستیاران[۳۹, ۴۰] نیز خنککاری چند نوع پیل سوختی غشاء پلیمری را با این شیوه بررسی کردهاند.

۲-۳-۲) خنککاری با جریان هوا

صل دوم

گاهی برای خنک کاری پیل سوختی غشاء پلیمری، صفحاتی که دارای کانالهایی برای عبور جریان هوا هستند در داخل پیل تعبیه می کنند. اغلب این شیوه برای پیلهایی با قدرت بین ۱۰۰ وات تا ۲ کیلو وات کاربرد دارد و اساساً برای پیلهایی با قدرت بالاتر از ۵ کیلو وات غیر قابل استفاده است. اثر دما و رطوبت نسبی هوای محیط بر عملکرد پیل سوختی هوا خنک به طور آزمایشگاهی توسط چوی و همکاران[۴1] مورد مطالعه قرار گرفته است. آدزاکپا و همکاران[۴۲] یک مدل سه بعدی حرارتی برای مطالعه توزیع حرارت در یک پیل سوختی هوا خنک ارائه کرده و نتایج حاصله را به صورت آزمایشگاهی اعتبارسنجی نمودهاند.

۲-۳-۳) خنککاری با مایع

با فرض ثابت بودن توان پمپاژ، ضریب انتقال حرارت در جریان مایع بسیار بالاتر از این ضریب در جریان هوا میباشد. لذا در پیلهای سوختی با قدرت بیشتر از ۵ کیلووات، از مایع به عنوان سیال خنک کننده استفاده می شود. در پیل های سوختی معمولاً آب و یا مخلوط آب و ضدیخ به عنوان مایع خنک کننده کاربرد دارند. مشابه خنک کاری با هوا، مایع خنک کننده در کانال هایی که در صفحات خنککاری یا صفحات قطبی تعبیه شدهاند جریان پیدا میکند. از آنجایی که خنککاری پیلهای سوختی با مایع کاربردهای وسیعی به خصوص در صنایع خودروسازی دارد، تلاشهایی در جهت بهینهسازی طراحی میدان جریان، بهینهسازی هندسه کانالهای جریان و بهینهسازی سیستم خنک کاری با مایع انجام شده است. چن و همکاران[۳۱] چند میدان جریان متفاوت را از منظر حرارتی آنالیز کردهاند تا میدان جریان بهینه مشخص شود. آنها با تعریف کمیتی به نام شاخص یکنواختی دما که مشخص کننده تغییرات دما در کل صفحه خنک کاری است، به مقایسه شش طرح مختلف برای میدان جریان پرداختند. همچنین هر طرح از نظر میزان افت فشار وارسی شده است. در تحقیقی مشابه، چوی و دستیاران[۳۲] به بررسی تأثیر شکل میدان جریان بر ویژگیهای عمل خنککاری پیل سوختی پرداختهاند. بیک و دستیاران[۴۳] چند میدان جریان پیچیدهتر را به صورت عددی مورد مطالعه قرار دادند و عملکرد آنها را در زمینه خنککاری مقایسه کردهاند. در سال ۲۰۱۱ میلادی، یک تحقیق عددي بر روي طراحي ميدان جريان يک پيل سوختي غشاء پليمري با قدرت ۵ کيلو وات توسط اصغري و همکاران [۴۴] صورت گرفت. افشاری و شریعتی [۴۵]، به بررسی هشت مدل مختلف صفحه خنک کاری با کانالهای عبور جریان موازی پرداخته و عملکرد آنها را بر اساس معیارهای دمای حداکثر سطح،

¹ Index Of Uniform Temperature

دمای میانگین سطح، یکنواختی دما و افت فشار سیال خنک کننده مقایسه کردهاند. در یک طرح جالب که توسط لی[۴۶] پیشنهاد شد، میدان جریانی با دبیهای متفاوت در قسمتهای مختلف صفحه خنک کاری بررسی شده است و از این طریق توزیع دمای یکنواخت تری به دست آمده است. هاشمی[۱] در رساله دکتری خود چند میدان جریان مختلف را به صورت عددی مطالعه کرده است. در این رساله، علاوه بر کمیتهای افت فشار و یکنواختی دما، میزان تولید آنتروپی در طرحهای مختلف میدان جریان محاسبه شده است. لاسبت و دستیاران[۲۶, ۴۷] در مطالعات خود سعی کردند که با تغییر هندسه کانالهای خنککاری، جریانی آرام ولی نامنظم (را به منظور افزایش ضریب انتقال حرارت جابهجایی در این کانالها ایجاد کنند. در این راستا، دو کانال با هندسه جدید پیشنهاد شده است. اولین کانال هندسهای زیگزاگی دارد. برای این کانال مشخص شده که ضریب انتقال حرارت دو برابر کانال مستقیم است. کانال دوم دارای هندسهای C-شکل است که ضریب انتقال حرارت برای آن شش برابر کانال مستقیم است؛ ولی افت فشار را تا حد زیادی بالا میبرد. پاراکاش و دستیاران[۴۸] چهار هندسه مختلف برای میدان جریان سیال خنک کننده در پیلهای سوختی غشاء پلیمری پیشنهاد دادند که سیال خنک کننده آب میباشد. مسأله جریان سیال و انتقال حرارت در هندسههای مورد نظر به صورت عددی حل شده و عملکرد این میدانهای جریان از منظر حداکثر دمای سطح، یکنواختی دما در سطح و افت فشار سیال مقایسه گردیده است.

^{&#}x27; Chaotic

گلد و همکاران [۴۹] عملکرد حرارتی دو طرح مختلف برای میدان جریان را به روش عددی بررسی کرده و نتایج حاصل را با دادههای آزمایشگاهی به دست آمده از اندازه گیری دما با دستگاه مادون قرمز مقایسه کردهاند. در مطالعه شیمی و دستیاران [۵۰] فرض شده که جهت خنککاری پیل سوختی، لولهای به صورت مارپیچ از میان پیل عبور میکند و در داخل لوله آب جریان دارد. این مسأله با روش عددی حل گشته و بر روی تأثیر پارامترهایی چون سرعت سیال در داخل لولهها، تعداد انشعابات لوله و قطر لوله بر توزیع دمای داخل پیل بحث شده است.

افشاری و شریعتی[۵۱] در طرحی نو، به بررسی تأثیر استفاده از فوم فلزی به عنوان توزیع کننده سیال خنککاری پرداختند. در مطالعه آنها، عملکرد میدان جریان با ساختار فوم فلزی، با سه طرح دیگر برای میدان جریان مقایسه و مشخص شده است که فوم فلزی، این پتانسیل را دارد که به عنوان توزیع کننده جریان سیال خنککاری برای بهبود عملکرد توده پیل انتخاب شود.

در این پایاننامه، چهار صفحه خنککاری مختلف در نظر گرفته شده که هندسه این صفحات در بخش ۵-۲ توضیح داده خواهد شد.

۲-۳-۴) خنککاری همراه با تغییر فاز

ل دوم

استفاده از تغییر فاز سیال خنک کننده به عنوان روشی نو در زمینه خنک کاری پیل سوختی مطرح است. با وجود این که در پیلهای سوختی غشاء پلیمری با توان بالا، خنک کاری با مایع بیشترین کاربرد را دارد؛ اما سیستمهایی که خنککاری را از طریق تغییر فاز انجام میدهند نیز جذابیتهای خاص خود را دارند که از میان آنها میتوان به کاهش دبی سیال خنککننده و سادهتر بودن سیستم اشاره کرد. در میان مقالات، تحقیقهای کمتری وجود دارد که خنککاری پیل سوختی غشاء پلیمری را تحت تغییر فاز بررسی کرده باشند. به عنوان نمونه مراجع [۵۲] و [۳۳] به خنککاری در خلال تبخیر و مراجع [۵۳] و [۵۴] به خنککاری طی فرآیند جوشش پرداختهاند.

۲-۳-۵) سایر روشهای خنککاری

صل دوم

گاهی خنک کاری پیل سوختی را با افزایش جریان هوای ورودی به آن انجام میدهند بدین ترتیب که هوای بیشتری نسبت به هوای استوکیومتری وارد پیل میکنند تا گرمای تولیدی در پیل توسط جریان هوای اضافه به خارج از آن دفع گردد. این شیوه سیستم خنک کاری را بسیار ساده کرده و بینیاز از پمپ یا فن اضافه و کانالهای مجزا برای خنک کاری میباشد. البته این روش میتواند باعث خشک شدن غشاء و یا کاهش توان مفید گردد.

خنک کاری تبخیری^۱ روش دیگری برای دفع گرمای اضافه از پیل سوختی میباشد. در این شیوه آب را به صورت پودری از ذرات بسیار ریز وارد جریان هوای آند میکنند. ذرات آب وارد شده به آند به دلیل

¹ Evaporative Cooling

۲-۴) خنککاری پیل سوختی غشاء پلیمری با استفاده از نانو سیال

ل دوم

شرایط هیدرودینامیکی در داخل کانالهای جریان صفحات خنک کننده به گونهای است که جریان آرام میباشد. پیشبینی میشود در آینده اندازه پیلهای سوختی کاهش یافته و بنابراین عدد رینولدز کم شود. به خوبی میدانیم که رژیم جریان آرام برای انتقال حرارت جابهجایی با نرخ بالا مناسب نیست؛ بنابراین لازم است مطالعاتی در جهت بهبود انتقال حرارت در پیل سوختی انجام گیرد. به طور کلی تغییر میزان انتقال حرارت جابهجایی با ایجاد تغییرات در هندسه، شرایط جریان و یا نوع سیال خنک کننده امکان پذیر است [۲۶]. از نظر نوع سیال خنک کننده، اگرچه استفاده از آب خالص در پیل سوختی مؤثر است؛ اما خواستار سیالی هستیم که در خنک کاری پیل نتایج بهتری را در بر داشته باشد. استفاده از چنین سیالی به عنوان یک مبحث نو در مدیریت گرمای پیل سوختی مطرح خواهد بود [۴۹]. با توجه به خصوصیات ویژهای که نانو سیالات دارند، در سال های اخیر مورد توجه محققان قرار گرفتهاند.

¹ Electroosmotic Drag

فصل دوم

۲–۴–۱) مزایا و چالشهای استفاده از نانو سیال در سیستم خنککاری پیل سوختی پیلهای سوختی به نسبت توان تولیدی و بازده بالای خود، نیازمند رادیاتورهای بزرگ در سیستم خنک کاری خود هستند؛ زیرا اختلاف دمای کار کرد پیل و محیط کم است. این موضوع به عنوان مشکلی به ویژه در کاربردهای حمل و نقلی مطرح می باشد. مشخص شده که استفاده از نانو سیالات به عنوان سیال خنک کننده در پیل سوختی، میتواند باعث کاهش ۱۰ درصدی اندازه سطح پیشانی رادیاتور سیستم خنککاری شود [۶]. با کاهش اندازه مجموعه پیل، نیروی درگ وارد بر خودرو کاهش یافته و مشکل جانمایی پیل در خودرو مرتفع می گردد. باید توجه کرد که همواره کاهش اندازه، وزن و قیمت سیستم تولید توان وسایل حمل و نقل، یکی از بزرگترین چالشهایی است که کارخانههای سازنده را در گیر می کند. حذف فیلتر یون زدا^۱ از دیگر مزایای استفاده از نانو سیال در سیستم خنک کاری پیل های سوختی است. حذف فیلتر یونزدا باعث کاهش افت فشار در مسیرهای خنککاری و کاهش هزینه استفاده از پیل سوختی میشود. مزیت دیگر نانو سیال پایین بودن نقطه انجماد آن است. وجود نانو ذرات، نقطه انجماد سیال پایه را کاهش میدهند. این موضوع در مناطق سردسیر حائز اهمیت میباشد.

^۱ Deionizing Filter: یونزدایی یک فرآیند شیمیایی است که طی آن کاتیونها و آنیونها حذف می شوند. در صورتی که جهت خنککاری پیل از آب استفاده شود، آب در خلال چرخش در سیستم خنککاری، یونهایی را از موادی که با آنها در تماس است دریافت می کند. جهت حذف این یونها از فیلتر یونزدا استفاده می شود. در صورتی که از نانو سیال به عنوان خنککننده استفاده شود، نانو ذرات با یونها واکنش نشان داده و آنها را حذف می کنند و دیگر نیازی به استفاده از فیلتر یونزدا وجود ندارد.

استفاده از نانو سیالات به عنوان خنک کننده چالشهایی را نیز به دنبال دارد. پایداری پایین، یکی از مهم ترین آنها است. البته همان طور که در بخش ۳–۴ بیان شد، امروزه روشهایی جهت افزایش پایداری نانو سیالات وجود دارد. به طور کلی مایلیم نانو سیالی که در پیل سوختی به عنوان سیال خنک کننده استفاده می شود، خواصی چون هدایت الکتریکی کم، نقطه انجماد پایین، قابلیت اشتعال و انفجار پایین و درجه سمیت ناچیز برای انسان و محیط داشته باشد.

۲-۴-۲) مروری بر تحقیقات صورت گرفته در زمینه خنککاری پیل سوختی با نانو سیال با توجه به این که مباحث پیل سوختی و نانو سیال از حوزههای نسبتاً جدید علمی بوده و در راه پیشرفت هستند، مراجع زیادی در خصوص خنککاری پیل سوختی غشاء پلیمری توسط نانو سیال وجود ندارد. اسلام و همکاران [۶] در مقالهای مروری که در سال ۲۰۱۵ میلادی به چاپ رسیده، پتانسیل و چالشهای استفاده از نانو سیال در سیستمهای خنککاری پیلهای سوختی را بررسی و عنوان کردهاند که تا امروز، مطالعات بسیار اندکی در خصوص بهبود وضعیت خنککاری پیل صورت گرفته و تقریباً هیچ تحقیقی در راستای خنککاری داخل پیل با نانو سیال انجام نشده است. شاید تنها مقاله موجود در این زمینه، مطالعات بسیار اندکی در خصوص بهبود وضعیت خنککاری پیل صورت گرفته و تقریباً میچ تحقیقی در راستای خنککاری داخل پیل با نانو سیال انجام نشده است. شاید تنها مقاله موجود در این زمینه، مطالعه زکریا و همکاران[۵۵] باشد. در این مقاله که در سال ۲۰۱۴ میلادی به چاپ رسیده، خنککاری یک پیل سوختی غشاء پلیمری با توان ۲۰۰ وات توسط نانو سیال به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. سیال پایه مخلوط آب و گلایکول با نسبت یکسان و نانو ذرات از جنس

اکسید آلومینیوم با غلظتهای ۱/۱ و ۵/۱ درصد هستند. دمای سیال خنک کننده در قسمتهای ورودی به پیل و خروجی از آن اندازه گیری شده و بر این اساس میزان انتقال حرارت صورت گرفته بین سیال خنک کننده و پیل سوختی محاسبه گردیده است. در این مقاله به عنوان نتیجه گیری بیان شده که استفاده از نانو سیال تأثیر زیادی بر عملکرد پیل سوختی مورد آزمایش ندارد؛ ولی اضافه کردن نانو ذرات به سیال خنک کننده، عملکرد حرارتی پیل را بهبود داده است. البته دمای سیال ورودی و خروجی و میزان انتقال حرارت صورت گرفته بین سیال خنک کننده و پیل، معیارهای مناسب و کافی جهت بررسی عملکرد یک سیال خنک کننده در پیل سوختی غشاء پلیمری نیستند؛ زیرا بر خلاف بسیاری از وسایل صنعتی که تنها عامل مهم در خنککاری آنها اجتناب از رسیدن دما به حد خاصی است، مدیریت گرما در پیل سوختی غشاء پلیمری فرآیند پیچیدهای است. جهت بررسی عملکرد یک سیال خنککننده در پیل لازم است کمیتهای دیگری نیز مورد مطالعه قرار گیرد؛ زیرا بازده و طول عمر پیل به شدت به میزان دما در آن بستگی دارد. از دیگر کمیتهای مهم جهت ارزیابی عملکرد یک سیال خنککننده در پیل سوختی غشاء پلیمری می توان به توزیع دما در پیل، دمای حداکثر سطح پیل و یکنواختی دما در پیل اشاره کرد. میزان افت فشار در کانالهای خنککاری از دیگر مواردی است که جهت بررسی عملکرد یک سیال خنک کننده ضروری است.

فصل سوم

نانوسال

۳–۱) مقدمه

سيالاتي كه حاوي ذرات جامد با ابعاد نانومتر هستند، نانو سيال٬ ناميده ميشوند. در واقع نانو سيال مخلوطی است که از اضافه کردن نانو ذرات٬ به یک سیال پایه٬ حاصل میشود. اندازه نانو ذرات معمولاً بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر است و هر نانو ذره فقط از چند صد یا هزار اتم تشکیل شده است. واژه نانو سیال را نخستین بار چوی[۵۶] در سال ۱۹۹۵ میلادی و در مطالعهای که در آزمایشگاه ملی آرگون آمریکا انجام گرفت، استفاده کرد. نانو سیالات را می توان نسل جدید سیالات دانست. این مواد خصوصیات جالبی در مقایسه با سیال پایه خود دارند. نانو ذرات می توانند جریان سیال پایه و انتقال حرارت صورت گرفته توسط آن را دگرگون کنند [۵۷]. نانو سیالات در طبیعت فراوان هستند، مثل خون که یک نانو سیال پیچیده و ترکیبی میباشد و در آن نانو ذرات مختلف وظایف گوناگونی را انجام میدهند [۵۸]. نانو سیالات را می توان به دو دسته فلزی و غیر فلزی تقسیم بندی کرد. در نانو سیالات فلزی، نانو ذرات فلزی مثل آلومینیوم، مس، نیکل و غیره با سیال پایه مخلوط میشوند. نانو سیالات غیرفلزی از اختلاط سيال پايه با نانو ذرات غير فلزي نظير اكسيد فلز، آلوتروپهاي كربن أو غيره تهيه مي شوند [۵۹].

[\]Nanofluid

^v Nano Particle

^{*} Base Fluid

^{*} Allotropes Of Carbon

در شکل (۳-۱) دو تصویر گرفته شده از نانو سیال توسط میکروسکوپ انتقال الکترونی^۱(TEM) نشان

داده شده است.



شكل ٣-١: تصاوير نانو سيال [٤٠] الف) نانو سيال Al₂O₃-آب ب) نانو سيال ZnO-آب [٤١]

میزان انتقال حرارت جابهجایی میتواند با تغییر هندسه جریان، شرایط مرزی و یا با بهبود ضریب هدایت حرارتی سیال عامل افزایش پیدا کند. افزایش انتقال حرارت و نیز سیالات انتقال دهنده حرارت، موضوع بسیاری از تحقیقات مهندسی هستند. سیالات انتقال دهنده حرارت، شرایط را برای تبادل انرژی در یک سیستم مهیا میکنند و اثرات و میزان کارایی آنها بستگی به ویژگیهای فیزیکی از قبیل ضریب هدایت حرارتی، لزجت، چگالی و ظرفیت گرمایی دارد. در اغلب موارد، هدایت حرارتی پایین مهم ترین محدودیت سیالات انتقال دهنده حرارت میباشد. در برخی از مطالعات قدیمی، سعی شده است تا با

¹ Transmission Electron Microscopy

اضافه کردن ذراتی با اندازه میکرو یا بزرگتر به سیال پایه، ضریب هدایت حرارتی آن را بالا ببرند؛ زیرا همان طور که در جدول (۳–۱) دیده می شود، مواد جامد ضریب هدایت حرارتی بالاتری از سیالات دارند.

نوع مادہ	مادہ	ضریب هدایت حرارتی (W/m K)
جامدات فلزى	مس	4.1
	آلومينيوم	۲۳۷
جامدات غیر فلزی	سيليكون	۱۴۸
	آلومينا	۴.
مايعات فلزى	سديم	٧٢
مايعات غير فلزى	آب	•/81٣
	ضديخ	•/۲۵۳
	روغن موتور	۰/۱۴۵

جدول ۳-۱: مقایسه ضریب هدایت حرارتی در جامدات و سیالات[۵۷]

نداشت. این عدم ناپایداری، باعث مقاومت بیشتر سیال در برابر جاری شدن و افزایش خوردگی فیزیکی^۱ میشد. از این رو چنین سیالاتی هنوز تجاری نشده بودند. تا این که فناوری جدید نانو امکان تولید موادی با اندازه کمتر از ۵۰ نانومتر را فراهم ساخت. سطح تماس بالاتر نانو ذرات در مقایسه با ذرات قدیمی

به دلیل اندازه بزرگ و چگالی بالای مواد جامد، راه مناسبی برای جلوگیری از تهنشینی آنها وجود

(حدود هزار برابر)، نه تنها ظرفیت انتقال حرارت جابه جایی را افزایش می دهد، بلکه باعث پایداری بالاتر

سوسپانسیون ها می شود. علاوه بر این، کاهش قابل ملاحظه سایش در مقایسه با ذرات بزرگ قدیمی را

در پی دارد؛ بنابراین با استفاده از خصوصیات منحصر به فرد نانو ذرات، نانو سیالات دو ویژگی مهم دارند

نانوسال

که برای سیستمهای انتقال حرارت بسیار مهم است. اولین ویژگی، پایداری بالا و دومین ویژگی، هدایت

[.]

^{&#}x27; Erosion

حرارتی بالا میباشد [۵۸, ۵۷]. در سالهای اخیر تحقیقات متعدد نشان دادند که در هر دو رژیم جریانی آرام و مغشوش، وجود نانو ذرات باعث افزایش انتقال حرارت می گردد. از سوی دیگر مشخص شده است که وجود نانو ذرات، تأثیر نامطلوبی بر اصطکاک دیواره دارد؛ اما برای یک میزان انتقال حرارت معین و ثابت، در صورت استفاده از نانو سیال به دلیل آن که دبی مورد نیاز کمتر است، ممکن است قدرت مورد نیاز برای پمپاژ کاهش یابد [۶۳, ۶۲].

۲-۳) خواص ترموفیزیکی نانو سیالات

اضافه کردن نانو ذرات به سیال پایه باعث میشود خصوصیات ترموفیزیکی سیال پایه به کلی دگرگون گردد. یکی از مهمترین این خاصیتها که دستخوش تغییرات زیادی میشود، ضریب هدایت حرارتی سیال میباشد. در گذشته رفتار نانو سیالات توسط دانشمندان مختلف و در شرایط مختلفی بررسی و مشخص شده است که هدایت حرارتی و ویسکوزیته نانو سیالات نسبت به سیال پایه بالاتر است [۶۴]. در این متن به بررسی چهار خاصیت مهم نانو سیال که در حل معادلات جریان و انرژی به آنها نیاز داریم پرداخته میشود. این چهار خاصیت مهم عبارتاند از: چگالی، ظرفیت گرمایی ویژه، ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی. از بین این خواص، چگالی و گرمای ویژه، روش محاسبه سادهتری دارند و معمولاً محققان مختلف، از روشی مشابه برای محاسبه آنها استفاده میکنند. در مقابل، دستیابی به دو خاصیت ضریب هدایت حرارتی و ویسکوزیته دارای دشواری بیشتری است و راههای گوناگونی توسط

به منظور محاسبه خواص نانو سيال، غلظت حجمي نانو ذرات حائز اهميت است. اين كميت از رابطه

 $\varphi = \frac{\forall_p}{\forall_p + \forall_f}$ (۱-۳)

در این رابطه، $_{p}$ حجم نانو ذرات و $_{f}$ حجم سیال پایه میباشد. گاهی غلظت حجمی نانو ذرات بر حسب درصد بیان میشود.

۳-۲-۱) چگالی نانو سیال

چگالی یک نانو سیال تابعی از دانسیته سیال پایه، دانسیته نانو ذرات و غلظت حجمی نانو ذرات میباشد. محاسبه چگالی نانو سیال بر اساس قانون فیزیکی حاکم بر مخلوطها و به صورت زیر انجام

$$\begin{split} \rho_{nf} &= \frac{m_{nf}}{\forall_{nf}} = \frac{m_f + m_p}{\forall_f + \forall_p} = \frac{\rho_f \forall_f + \rho_p \forall_p}{\forall_f + \forall_p} \\ &= \left(1 - \varphi\right) \rho_f + \varphi \rho_p \end{split} \tag{Y-T}$$

و

۳-۲-۳) ویسکوزیته نانو سیال گرانروی نشاندهنده مقاومت یک سیال در برابر تغییر شکل ناشی از تنشهای برشی میباشد. ویسکوزیته اهمیت ویژهای در طراحی سیستمهای نانو سیالی بازی می کند و اثرات مستقیم آن بر افت فشار در جریانهای جابه جایی بسیار مشهود است؛ بنابراین مقدار ویسکوزیته نانو سیال باید به طور کامل مورد بررسی و ارزیابی قرار بگیرد.

اینشتین(۱۹۵۶) اولین نفری بود که به محاسبه ویسکوزیته سوسپانسیونها پرداخت و معادله خود

را به صورت زیر بیان کرد [۵۷].

ىل يوم

$$\mu = (1 + 2.5\varphi)\mu_f \tag{(f-r)}$$

در بسیاری از مقالات از این رابطه برای محاسبه غلظت نانو سیال استفاده شده است و این در صورتی است که رابطه انیشتین فقط برای غلظتهای پایین قابل استفاده میباشد. با بالا رفتن غلظت، خطای این رابطه بسیار افزایش یافته و عملاً کاربرد آن صحیح نمیباشد. پس از انیشتین، دانشمندان مختلفی مدلهای خود را جهت محاسبه غلظت نانو سیال ارائه دادند. بعضی از این مدلها مبنای آزمایشگاهی و برخی پایه نیمه تجربی دارند. برای مثال میتوان به مدلهای ارائه شده توسط پاک و چو[۶۵] در سال ۱۹۹۸ و میگا و همکاران [۶۲] در سال ۲۰۰۴ اشاره کرد. این مدلها، تابعی از ویسکوزیته سیال پایه و غلظت نانو ذرات هستند. در سال ۲۰۰۳ مدلی توسط پترا و همکاران [۶۶] جهت محاسبه ویسکوزیته نانو سیال دو از ۲۰۱۹ میتوان به مدل ی محاران از ۶۹] میت محاسبه ویسکوزیته نانو سیال دو از ۲۰۱۹ میتند. در سال ۲۰۰۳ مدلی توسط پترا و همکاران از ۶۹ است. کورکیونه[۶۷] در سال ۲۰۰۳ مدلی توسط پترا و همکاران از ۶۹ است. کورکیونه[۶۷] در سال ۲۰۱۱ میلادی رابطهای برای محاسبه ویسکوزیته نانو سیالات ارائه کرد است. کورکیونه[۶۷] در سال ۲۰۱۱ میلادی رابطهای برای محاسبه ویسکوزیته نانو سیالات ارائه کرد که تأثیر وزن مولکولی، چگالی و اندازه نانو ذرات را هم در نظر می گیرد.

مقدار محاسبه شده تئوری میباشد [۵۷].

۳-۲-۴) ضریب هدایت حرارتی نانو سیال

ضریب هدایت حرارتی، نشان گر توانایی ذاتی یک ماده در انتقال حرارت است و کمیت مهمی در مباحث انتقال حرارت میباشد. همان طور که میدانیم هر دو نوع انتقال حرارت هدایتی و جابه جایی به ضریب هدایت حرارتی بستگی دارند [۵۹]. اضافه کردن نانو ذرات به سیال پایه باعث می شود ضریب هدایت حرارتی آن افزایش یابد. قدیمی ترین مشاهدات در خصوص بهبود هدایت حرارتی در مایعاتی که

حاوی ذراتی با ابعاد کوچکتر از میکرومتر هستند، توسط ماسودا و همکاران [۶۸] در سال ۱۹۹۳ میلادی صورت گرفته است. برای توضیح دلیل افزایش ضریب هدایت حرارتی نانو سیال، کبلینسکی و همکاران[۶۹] و ایستمن و همکاران[۷۰] چهار مکانیزم را ممکن دانستند که عبارتاند از حرکت برآونی (نانو ذرات، لایهبندی مولکولهای مایع در سطح مشترک مایع-جامد، ماهیت انتقال حرارت در نانو ذرات و تأثیرات دستهبندی نانو ذرات. ایوانز و همکاران[۷۱] در تحقیقات خود متوجه شدند که سهم حرکت برآونی در هدایت حرارتی نانو سیال بسیار کم است و نمیتواند دلیل انتقال حرارت فوقالعاده در نانو سیالات باشد [۵۷]. سطح تماس بسیار بالای نانو ذرات، دلیلی است که برخی دانشمندان جهت افزایش ضریب هدایت حرارتی نانو سیال بیان می کنند. به عنوان نمونه، در نانو ذراتی که کوچکتر از ۲۰ نانو متر هستند، حدود ۲۰ درصد اتمهای تشکیل دهنده نانو ذره، در سطح آن قرار دارند. این خاصیت باعث عملکرد آنی نانو ذره در فعل و انفعالات حرارتی می گردد. تعدادی از محققان با استفاده از مفهوم لایه میانی بین سیال و جامد به توضیح افزایش غیر عادی ضریب هدایت حرارتی پرداختند. یو و چوی [۷۲] در سال ۲۰۰۳ و ۲۰۰۴ میلادی مدلهایی ارائه دادند که یک لایه از مولکولهای مایع را در اطراف ذرات جامد در نظر می گرفت. برخی محققان بر این باورند که لایهبندی مولکول های سیال در سطح مشترک

^۱ Brownian Motion: در فیزیک به نوعی از حرکت تصادفی ذرات غوطهور در سیال بر اثر بخورد این ذرات با اتمها یا مولکولهای سیال گفته می شود. در سال ۱۸۲۷ میلادی، رابرت بر آون گیاه شناس هنگامی که توسط میکروسکوپ به گردههای گیاه معلق در آب نگاه می کرد، متوجه حرکت ذرات در آب شد، ولی نتوانست توجیهی برای آن پیدا کند. اتم و مولکول بسیار پیشتر از آن شناخته شده بودند، اما این آلبرت اینشتین بود که چند دهه بعد در مقالهای که در ۱۹۰۵ منتر کرد توضیح داد که حرکتی زات در آب شد، ولی نتوانست توجیهی برای آن پیدا کند. اتم و مولکول بسیار پیشتر از آن شناخته شده بودند، اما این آلبرت اینشتین بود که چند دهه بعد در مقالهای که در ۱۹۰۵ منتشر کرد توضیح داد که حرکتی که برآون مشاهده کرده در نتیجه برخورد مولکول ها مرتباً تغییر می کند و ذره در زمانهای مختلف ممکن است از یک سمت بیشتر مورد اصابت قرار گیرد تا از سمت دیگر که این امر موجب حرکت می کند و ذره در زمانهای مختلف ممکن است از یک سمت بیشتر مورد اصابت قرار گیرد تا از سمت دیگر که این امر موجب حرکت می کند و تفاقی می در زمانهای محکن است از یک سمت بیشتر مورد اصابت قرار گیرد تا از سمت دیگر که این امر موجب حرکت می کند و ذرات می شود. این پیدا کند بر مورد به این از موجب حرکت می کند و ذره در زمانهای مختلف ممکن است از یک سمت بیشتر مورد اصابت قرار گیرد تا از سمت دیگر که این امر موجب حرکت ات اتفاقی ذرات می شود. این پیده به افترار رابرت برآون حرکت برآونی نام گذاری شده است.

مایع-جامد باعث ایجاد یک لایه شبه جامد می شود که دلیل اصلی افزایش ضریب انتقال حرارت هدایتی می باشد. مطابق شکل (۳-۲) این بررسی ها عنوان می کنند که نانو سیال یک ماده مر کب است و از یک نانو ذره به عنوان هسته و یک نانو لایه ^۱ یا لایه بینابینی^۲ که نانو ذره را احاطه می کند تشکیل شده است. این مجموعه در سیال پایه غوطه ور شده است. نانو لایه یک لایه شبه جامد با شبکه منظم است

که ضریب هدایت حرارتی آن بزرگتر از سیال پایه و کمتر از ذرات جامد میباشد [۷۳].



شکل ۳-۲ : لایه بندی سیال در اطراف نانو ذرات [۶۴]

به طور کلی، مطالعات صورت گرفته در زمینه بهبود هدایت حرارتی نانو سیال را میتوان به دو دسته

تحقيقات آزمايشگاهي و تحقيقات تئوري تقسيمبندي كرد.

[\] Nanolayer

^r Interfacial Layer

۳-۲-۴-۱) بررسی آزمایشگاهی هدایت حرارتی نانو سیال برای اندازه گیری خواص حرارتی مواد، از یکی از روشهای پایدار ا یا گذرا ۲ استفاده می شود. اغلب روش گذرای سیم داغ^۳ جهت اندازه گیری ضریب هدایت حرارتی نانو سیالات مورد استفاده قرار گرفته است. در سالهای اخیر میکروسکوپهای وارسی هدایت حرارتی^۴ توسعه یافتهاند. با استفاده از این وسیله می توان ضریب هدایت حرارتی ساختارها و ترکیبات میکروسکوپی را اندازه گیری کرد [۷۴]. ماسودا و همکاران [۶۸] ضریب هدایت حرارتی مخلوط Al₂O₃-آب را اندازه گیری کردند. آنها دریافتند که ضریب هدایت حرارتی نانو سیال به غلظت حجمی نانو ذرات بستگی دارد. پس از آن محققان دیگری نانو سیالات دیگری را مورد آزمایش قرار دادند و وابستگی ضریب هدایت حرارتی نانو سیالات مختلف به غلظت حجمی نانو ذرات را گزارش کردند ([۶۵, ۲۵–۷۷]). در سال ۲۰۰۳ میلادی داس و همکاران[۶۶] آزمایشاتی را بر روی Al₂O₃-آب و CuO-آب انجام داده و دریافتند که ضریب هدایت حرارتی نانو سیال بستگی شدیدی به غلظت نانو ذرات و بستگی ضعیفتری به دما دارد.

[\] Steady state

^r Transient

^r Transient hot-wire method

^{*} Scanning thermal conductivity microscope

۳-۲-۴-۲) بررسی تئوری هدایت حرارتی نانو سیال

فرمول بندی قدیمی در خصوص هدایت حرارتی مخلوطها، فقط شامل مواردی چون اندازه و شکل ذرات و درصد حجمی انها میشود. این روشها میتوانند تخمین خوبی برای سیستمهایی که حاوی ذراتی با اندازه میکرومتر و بالاتر هستند ارائه دهد؛ اما در خصوص توضیح انتقال حرارت در نانو سیالات ناکارآمد میباشد. در خصوص ضریب هدایت حرارتی نانو سیال تئوری معتبری که در تمامی موارد این ضریب را به درستی محاسبه کند وجود ندارد [۵۷]. با بررسی مقالات مشخص می شود که مدل های زیادی برای تخمین ضریب هدایت حرارتی نانو سیالات موجود هستند. این مدلها را میتوان به دو دسته کلی مدلهای استاتیکی و مدلهای دینامیکی تقسیم بندی کرد. در مدلهای استاتیکی فرض می شود نانو ذرات در سیال پایه ساکن هستند و ضریب هدایت حرارتی را بر پایه هدایت تخمین میزنند. مدلهای دینامیکی حرکت تصادفی نانو ذرات در سیال پایه(حرکت برآونی) را نیز در نظر میگیرند [۵۸]. مدل ماکسول(۱۸۸۱ میلادی) یکی از اولین مدلها برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی مخلوط مایع-جامد با ذرات نسبتاً درشت با اندازه میکرومتر و میلیمتر میباشد. این مدل برای غلظتهای پایین ذرات جامد کاربرد دارد [۵۷]. پس از ماکسول، دانشمندان دیگری مدل های خود را ارائه دادند. مدلی که در سال ۱۹۹۷ میلادی توسط واسپ[۲۸] پیشنهاد شد یکی از اولین مدلها جهت محاسبه ضریب هدایت حرارتی نانو سیال است. از میان مدلهای دینامیکی میتوان به مدلهای پیشنهاد شده توسط کانافر [۷۹] در سال ۲۰۰۳ و کلنسترور [۸۰] در سال ۲۰۰۴ اشاره کرد.

۳-۳) خواص نانو سيال Al₂O₃-آب

به منظور شبیهسازی نانو سیال، لازم است خواص ترموفیزیکی آن را بدانیم. همانطور که در بخشهای گذشته بیان شد، جهت به دست آوردن خواص نانو سیال، روشهای گوناگونی توسط محققین مختلف پیشنهاد شده است. ممکن است برخی از این اسلوبها دقت پایینی داشته باشند؛ لذا در این پایاننامه، از رابطههای تجربی استفاده خواهد شد. نانو سیالی که در این مطالعه از آن استفاده می شود، نانو سیال Al2O3-آب است. فرض می شود اندازه نانو ذرات ۵۰ نانو متر است. با استفاده از پایگاه داده موسسه ملی استاندارد و فناوری(NIST) مقدار ظرفیت گرمایی ویژه نانو ذره Al2O3 برابر Al2O3 برابر و هناوری.

۳-۳-۱) ضریب هدایت حرارتی

ضریب هدایت حرارتی نانو سیال Al₂O₃-آب، توسط رسکنی و همکاران [۸۸] اندازه گیری شده است. ضریب هدایت حرارتی این نانو سیال، به صورت تابعی از دما و غلظت حجمی نانو ذرات و با استفاده از روش گذرای سیم داغ به دست آمده است. دستگاه مورد استفاده با سیالات مختلف و در دماهای مختلف آزمایش شده و مشخص گردیده که حداکثر خطای آن ۲٪± میباشد. این دستگاه با استفاده از سیمی پلاتینی با روکش تفلونی ساخته شده تا پارازیتهای رایج در این روش اندازه گیری حذف شوند. وابستگی

¹ National Institute of Standards and Technology

$$k_{nf}(\varphi, T) = k_f(T)(1 + 4.5503\varphi)$$
 (\(\Delta-\mathbf{T}))

همان طور که در رابطه (۳–۵) مشخص است، برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی نانو سیال، می ایست خصوصیات سیال پایه به صورت متغیر با دما مشخص باشند. در این پایان نامه، سیال پایه آب می باشد؛ بنابراین لازم است ضریب هدایت حرارتی آب به صورت تابعی از دما معین باشد. رامیرز و همکاران [۸۴] رابطه زیر را برای محاسبه ضریب هدایت حرارتی آب پیشنهاد کردند. حداکثر خطای این

رابطه، ۲/۷ درصد بوده و برای بازه دمایی ۱ تا ۹۷ درجه سلسیوس، قابل استفاده است.

$$k_{w} = 0.6065 \left(-1.48445 + 4.12292T^{*} - 1.63866 \times T^{*2} \right)$$
 (8-5)

$$T^* = \frac{T}{298.15} \tag{Y-T}$$

در رابطه بالا، T دمای مطلق آب و بر حسب کلوین می باشد.

فصل سوم



شکل ۳-۳: ضریب هدایت حرارتی نانو سیال Al₂O₃-آب بر حسب دما برای دو غلظت ۰/۰۶ و ۰/۰۱



شکل ۳-۴: نسبت ضریب هدایت حرارتی نانو سیال Al2O3-آب به ضریب هدایت حرارتی آب در غلظتهای مختلف

نانوسال

۳–۳–۲) ویسکوزیته

روی آب محک زده شده و مشخص گردیده است که حداکثر خطای آن ۰/۵ درصد می باشد. ویلیامز و

همکاران [۸۲] به برازش منحنی بر روی این دادهها پرداخته و رابطه زیر را به دست آوردند [۸۳].

$$\mu_{nf}(\varphi,T) = \mu_f(T) \exp\left[4.91\varphi/(0.2092-\varphi)\right]$$
 (A-Y)

با توجه به رابطه بالا، برای محاسبه ویسکوزیته نانو سیال، لازم است ویسکوزیته آب را به صورت تابعی از دما داشته باشیم. همان طور که میدانیم ویسکوزیته یک سیال نیوتنی با مشخص بودن حالت آن مشخص میشود؛ یعنی در کلیترین فرم (μ=μ(T,p) است. در خصوص مایعات، ویسکوزیته به شدت با دما تغییر می کند؛ اما تغییرات آن با فشار بسیار کم است. به عنوان مثال، اگر فشار آب از یک اتمسفر به ده هزار اتمسفر افزایش یابد، ویسکوزیته آن دو برابر خواهد شد. از این رو اثر فشار قابل صرف نظر است [۸۵]. با استفاده از رابطه تجربی زیر، ویسکوزیته آب در بازه دمایی ۲۰۰ تا ۲۰۰۳ و با خطای

$$\mu_{w} = (2.414 \times 10^{-5}) \times 10^{\left(\frac{247.8}{T - 140}\right)} \tag{9-7}$$

در این رابطه، T دمای مطلق آب و بر حسب کلوین میباشد.

حداکثری ٪۲/۵± قابل دستیابی است [۸۶].

[\]Capillary viscometer

با استفاده از روابط (۳–۸) و (۳–۹) میتوان ویسکوزیته نانو سیال Al₂O₃-آب را در غلظتها و دماهای مختلف به دست آورد. در شکل (۳–۵)، ویسکوزیته این نانو سیال برای دو غلظت ۰/۰۱ و ۰/۰۶ رسم شده است. همچنین شکل (۳–۶) نسبت ویسکوزیته نانو سیال Al₂O₃-آب به ویسکوزیته آب را در

غلظتهای مختلف نشان میدهد.

فصل سوم



شکل ۳-۵: ویسکوزیته نانو سیال Al2O3-آب بر حسب دما برای دو غلظت ۰/۰۶ و ۰/۰۱



شکل ۳-۶ نسبت ویسکوزیته نانو سیال Al₂O₃-آب به ویسکوزیته آب در غلظتهای مختلف

همانطور که مشخص است، ویسکوزیته نانو سیال با تغییر غلظت نانو ذرات، به صورت نمایی تغییر می کند. در غلظت ۰/۰۶، ویسکوزیته نانو سیال Al₂O₃-آب، ۷/۲ برابر ویسکوزیته آب میباشد. با توجه به این که میزان افت فشار با ویسکوزیته سیال رابطه مستقیم دارد، در مقالات به ندرت از غلظتهای بیشتر از ۶ درصد استفاده میشود. همچنین نانو سیال در غلظتهای بیشتر از ۲ درصد از پایداری خوبی برخوردار نبوده و در شرایط واقعی کمتر استفاده میشود.

۳-۳-۳) چگالی

چگالی نانو سیال تابعی از غلظت نانو ذرات و دما میباشد؛ اما وابستگی آن به غلظت بسیار بیشتر از دما است. برای محاسبه چگالی نانو سیال میتوان از رابطه (۳–۱) استفاده کرد. شکل (۳–۷) چگالی نانو



سیال Al₂O₃-آب را بر حسب دما برای دو غلظت ۰/۰۶ و ۰/۰۱ نشان میدهد.

شکل ۲-۳: چگالی نانو سیال Al₂O₃-آب بر حسب دما برای دو غلظت ۰/۰۶ و ۰/۰
۳-۳-۴) ظرفیت حرارتی ویژه

مشابه چگالی، ظرفیت حرارتی ویژه نانو سیال تابعی از غلظت نانو ذرات و دما میباشد؛ اما وابستگی آن به غلظت بسیار بیشتر از دما است. شکل (۳–۸) ظرفیت حرارتی ویژه نانو سیال Al₂O₃-آب را بر حسب دما برای دو غلظت ۲/۰۶ و ۲/۰۱ نشان میدهد. برای محاسبه ظرفیت گرمایی ویژه نانو سیال،

رابطه (۲-۳) استفاده می شود.



شکل ۳-۸: ظرفیت حرارتی ویژه نانو سیال Al₂O₃-آب بر حسب دما برای دو غلظت ۰/۰۶ و ۰/۰۲

۳-۴) پایداری نانو سیالات

منظور از ناپایداری نانو سیالات، انباشتگی نانو ذرات حول یکدیگر میباشد. تجمع نانو ذرات نه تنها باعث مسدود شدن مجاری عبور نانو سیال میشود؛ بلکه کاهش هدایت حرارتی نانو سیال را به دنبال خواهد داشت. شکل (۳–۹) سه نمونه از نانو سیال Al₂O₃-آب با غلظتهای ۰/۱، ۳/۰ و ۰/۵ درصد را

صل سوم

نشان میدهد. همان طور که در شکل مشخص است، تا یک ماه پس از آمادهسازی، نانو سیال کاملاً پایدار



است و پس از گذشت حدود ۱۰ ماه از آمادهسازی، مقدار اندکی تهنشینی مشاهده می گردد.

همان طور که ملاحظه می شود، نانو سیالات می توانند پایداری بالایی داشته باشند. پایداری نانو سیالات

با استفاده از اضافه کردن مواد فعال در سطح^۱، هم زدن فراصوتی^۲ و یا کنترل pH، افزایش مییابد.

^v Surfactants

^r Ultra Sonic Agitation

مل سوم

۳–۵) روشهای شبیهسازی نانو سیالات

در سالهای اخیر، دینامیک سیالات محاسباتی به عنوان علمی جهت مطالعه جریان سیال و انتقال حرارت صورت گرفته در آن توسعه یافته است. در شبیهسازی جریان نانو سیالات، از روشهای مختلفی استفاده میشود که در بخش آتی معرفی میگردند.

۳–۵–۱) روشهای تک فازی

مدلهای تک فازی در شبیهسازی نانو سیالات، شامل مدل تکفازی معمولی^۱ و مدل انتشار حرارت^۲ است. از آن جایی که نانو ذرات بسیار کوچک هستند، میتوان در نظر گرفت که این ذرات به سادگی شارانیده^۳ میشوند. در نتیجه، با صرف نظر از حرکت لغزشی نانو ذرات در سیال پایه و با فرض تعادل حرارتی بین نانو ذرات و سیال پایه، نانو سیال سیالی همگن خواهد بود. در روش تک فازی، معادلات مربوط به سیال خالص، بر نانو سیال حاکم هستند و این بدان معنی است که تمامی روابط کلاسیک سیال خالص برای نانو سیال قابل استفاده است؛ مشروط بر این که در محاسبات از خواص ترموفیزیکی نانو سیال استفاده شود. محاسبه درست و دقیق خواص نانو سیال، از مهم ترین چالشهایی است که هنگام استفاده از شیوه تک فازی با آن روبرو هستیم. به طوری که دقت نتایج به دست آمده هنگام

¹ Single-Phase Conventional Model

^r Thermal Dispersion Model

[&]quot; Fluidized

بستگی دارد [۸۸]. مدل انتشار ذرات، بر اساس شیوه تک فازی استوار است. در این روش سعی بر آن است تا اثر حرکات اتفاقی نانو ذرات در سیال پایه بر انتقال حرارت در نظر گرفته شود. از این رو فرض میشود، ضریب انتقال حرارت نانو سیال از دو قسمت تشکیل شده است. یک قسمت ضریب انتقال حرارت نانو سیال در حالت ساکن میباشد. قسمت دوم یک ضریب انتقال حرارت مجازی است که با ضریب انتقال حرارت نانو سیال در حالت ساکن جمع بسته میشود. با این کار یک ترم به معادله انرژی اضافه میشود. در این روش، حجم و زمان محاسبات نسبت به روش تک فازی معمولی، کمی بیشتر است. ازرینک و همکاران[۸۹] در سال ۲۰۱۲ میلادی نشان دادند که در انتقال حرارت صورت گرفته توسط نانو سیال،

استفاده از روش تک فازی، به دقت مدل انتخاب شده برای محاسبه خواص ترموفیزیکی نانو سیال

سهم پخش گرما در مقایسه با سهم افزایش ضریب هدایت حرارتی ناچیز است.

در روشهای تک فازی، زمان محاسبات نسبت به سایر روشها بسیار کمتر است. برخی از محققان بر این عقیدهاند که با استفاده از این شیوه محاسباتی، پاسخهایی نزدیک به نتایج آزمایشگاهی به دست میدهد. از این رو، این روش توجه بسیاری از دانشمندان را به خود جلب کرده است [۸۸].

۳-۵-۲) روشهای دو فازی

روشهای دوفازی که در مقالات جهت شبیهسازی نانو سیالات استفاده شدهاند را میتوان به دو دسته کلی اویلری-اویلری^۱ و اویلری-لاگرانژی^۲ تقسیمبندی کرد. گروه اویلری-اویلری شامل سه زیر گروه مدل ترکیبی"، مدل اویلری^۴ و مدل حجم سیال^۵ است. اگرچه روش اویلری-لاگرانژی شیوهای مناسب جهت فرمول بندى مخلوطها است؛ اما استفاده مستقيم آن جهت شبيهسازي نانو سيالات، مشكل است؛ زیرا با عنایت به اندازه بسیار کوچک نانو ذرات، هرچقدر هم که غلظت آنها کم باشد، تعداد بسیار زیادی نانو ذره وجود دارد. تعداد بسیار زیاد نانو ذرات، حجم و زمان محاسبات را به شدت افزایش میدهد. در این روش، سیال پایه به عنوان محیط پیوستهای در نظر گرفته میشود که نانو ذرات در آن یراکنده شدهاند. به عبارت دیگر؛ سیال پایه به روش اوپلری و نانو ذرات به شیوه لاگرانژی شبیهسازی می شوند. بر هم کنش بین سیال و نانو ذرات از طریق ترمهایی در معادلات مومنتم و انرژی در نظر گرفته می شود [۸۸]. بیانکو و همکاران [۹۰] جریان آرام و انتقال حرارت نانو سیال در داخل یک لوله را بررسی کرده و نتیجه گرفتند که تفاوت نتایج به دست آمده از روش اویلری-لاگرانژی و نتایج به دست آمده از روش تکفازی ناچیز است. در روشهای دوفازی، علاوه بر معادلات بقای جرم، مومنتم و انرژی،

^{&#}x27; Eulerian–Eulerian

 $[^]r$ Eulerian–Lagrangian

[&]quot; Mixture Model

⁺ Eulerian Model

^a Volume of Fluid Model

لازم است معادله کسر حجمی^۱ و یا معادله انتقال نانو ذرات نیز حل شود. شیوههای دو فازی نسبت به روش تک فازی پیچیدهتر بوده و حجم و زمان محاسباتی بسیار بیشتری را طلب میکنند.

۳–۵–۳) شیوه شبیهسازی نانو سیال در این پایاننامه

در این پژوهش از روش تکفازی همگن برای بیان رفتار نانو سیالات استفاده خواهد شد. البته خواص نانو سیال به صورت متغیر با دما در نظر گرفته می شوند. در بخش ۳–۳، خواص نانو سیال مورد مطالعه به صورت تابعی از دما، بیان گردید. تحقیقات متعددی نشان دادهاند که استفاده از روش همگن برای تحلیل رفتار نانو سیالات، ما را به نتیجه مطلوب می ساند. در این قسمت به برخی از این مطالعات اشاره می شود. علاوه بر این، در فصل چهارم، دقت شیوه انتخاب شده جهت شبیه سازی نانو سیال با حل مسأله جریان نانو سیال در یک لوله محک زده می شود.

در سال ۲۰۰۸ میلادی و در انجمن صنعتی ماساچوست^۲، ویلیامز و همکاران[۸۲] به اندازه گیری انتقال حرارت و افت فشار در جریان کاملاً توسعه یافته و مغشوش دو نانو سیال Al₂O₃-آب و Zirconia-آب پرداختند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان میدهند که در جریان مغشوش، در صورتی که در محاسبه اعداد بیبعد خصوصیات نانو سیال به صورت تابعی از دما و غلظت حجمی نانو ذرات در نظر گرفته شوند، میتوان مقادیر افت فشار و انتقال حرارت را توسط مدل ها و روابط کلاسیک محاسبه کرد.

Volume Fraction

^r Massachusetts Institute of Technology, USA

رعا و بونجورنو [۸۳] در مطالعهای که در همین خصوص انجام دادند، نشان دادند که نتیجه فوق در جریان آرام هم برقرار است. آنها با انجام آزمایشهایی اثبات کردند که نانو سیالها می توانند به عنوان یک مخلوط همگن رفتار کنند؛ بنابراین می توان آنها را با استفاده از روابط سیال همگن مورد مطالعه قرار داد مشروط بر آن که خواص نانو سیال به صورت تابعی از دما در نظر گرفته شوند. میگا و همکاران [۶۲] در مطالعه خود عنوان کردند که با توجه به اندازه بینهایت کوچک نانو ذرات، معقول خواهد بود که اشاره کنیم چنین ذراتی به آسانی شارانیده می شوند و بنابراین می توان فرض کرد که حرکت لغزشی بین فازها اگر هم وجود داشته باشد، قابل صرفنظر کردن است.

بونجورنو[۹۱] در سال ۲۰۰۶ میلادی با انجام آنالیز ابعادی بر روی معادله انرژی نشان داد که بهبود

انتقال حرارت در اثر انتشار نانو ذرات تقریباً به طور کامل قابل چشمپوشی است[۶۴] .

دینگ و همکاران [۹۲] به مطالعه جریان آرام نانو سیال در لوله پرداختند. نتایج حاصل از این تحقیق نشان میدهند که ضریب انتقال حرارت جابهجایی با تغییر ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی نانو سیال تغیر میکند اما تأثیر ضریب هدایت حرارتی بسیار بیشتر است. همچنین مشخص شد که نیروهای برآونی و ترموفورز ⁽ نقش بسیار کمرنگی در انتقال حرارت جابهجایی دارند.

^۱ Thermophoresis: پدیده ترموفورز میتواند در مخلوطهایی که حاوی ذرات متحرک در مقیاسهای میلیمتری و یا کوچکتر هستند به وجود آید. طی این پدیده، ذرات مختلف به نیروی حاصل از گرادیان دما پاسخهای متفاوتی میدهند. مثالی از این پدیده که با چشم غیر مسلح قابل مشاهده است وقتی اتفاق میافتد که دود تنباکو از اطراف یک میله داغ عبور میکند. ذرات کوچک هوا که فاصله بسیار کمی از میله دارند، گرم شده و به سمت نواحی خنکتر حرکت میکنند. وقتی این ذرات که داری دما و انرژی جنبشی بالایی هستند به ذرات بزرگتر و سنگینتر دود که دارای سرعت کمی هستند برخورد میکنند، آنها را از میله دور میسازند.

یوتومو و همکاران [۹۳] در سال ۲۰۱۴ میلادی به بررسی تجربی جریان آرام نانو سیال در لوله پرداختند و نتیجه گرفتند که نانو ذرات خواص سیال پایه را تغییر می دهند؛ اما وجود و حرکت نانو ذرات به دلیل نیروهای برآونی و ترموفورز در داخل سیال پایه، تأثیر ناچیزی بر ضریب انتقال حرارت دارد. عدد ناسلت در جریان نانو سیالات با استفاده از روابط استاندارد انتقال حرارت قابل محاسبه است که این موضوع نشان می دهد نانو سیالات با عنوان یک سیال خالص عمل می کنند. در این تحقیق عنوان شده است که مراجع [۹۴]، [۹۵] و [۹۶] نیز به نتیجه مشابه رسیدهاند. هوآنگ و ژانگ [۹۷] با بررسی جریان آرام نانو سیال در لوله، گزارش کردند که افت فشار اندازه گیری شده با معادله دارسی همخوانی دارد و حداکثر اختلاف مقادیر اندازه گیری شده با این معادله ۲/۴ درصد است که همخوانی خوبی با نتایچ ژوان و لی[۹۸] دارد.

. فصل جہارم پ

جریان نانوسال در لوله

۱-۴) مقدمه و پیشینه

کٹل جہارم

همان طور که در فصل قبل بیان گردید، در این پایان نامه از روش تکفازی همگن جهت شبیه سازی جریان و انتقال حرارت نانو سیال استفاده می شود. خواص نانو سیال هم به صورت تابعی از دما و غلظت حجمی نانو ذرات در نظر گرفته می شوند. در این فصل به منظور اطمینان از صحت روش انتخاب شده برای مدل سازی نانو سیال، جریان آرام نانو سیال در یک لوله که جدار آن به طور یکنواخت حرارت می بیند توسط نرم افزار فلوئنت مدل شده و نتایج حاصله با داده های آزمایشگاهی به دست آمده توسط رعا و بونجورنو [۸۸] مقایسه می گردد.

مسأله انتقال حرارت در جریان نانو سیالی که از یک لوله عبور می کند، به عنوان یک مسأله پایهای مورد توجه محققان زیادی بوده است. هر کدام از این پژوهشگران، نانو سیالات مختلفی را تحت شرایط مرزی مختلف مورد بررسی قرار داده و نتایج خود را ارائه کردهاند. پاک و چو[۶۵] در سال ۱۹۹۸ میلادی، جریان مغشوش نانو سیال در لوله را به طور آزمایشگاهی مورد بررسی قرار داده و متوجه شدند که استفاده از نانو سیال، انتقال حرارت را بهبود میدهد و باعث افزایش عدد ناسلت خواهد شد. همچنین عدد ناسلت و افت فشار با افزایش غلظت نانو ذرات و یا ازدیاد عدد رینولدز زیاد میشود. تأثیر عدد رینولدز و غلظت نانو ذرات بر انتقال حرارت و ضریب اصطکاک جریان نانو سیال OD-آب در داخل لوله، توسط ژوان و لی[۹۸] و به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. میگا و همکاران[۶۲] به موضوع

انتقال حرارت جابهجایی اجباری در یک لوله که در داخل آن نانو سیالهای Al₂O₃-آب و Al₂O₃-اتیلن گلایکول جریان دارد و دیواره آن به طور یکنواخت حرارت داده می شود پرداخته و گزارش دادهاند که در هر دو رژیم جریانی آرام و مغشوش، وجود نانو ذرات باعث افزایش انتقال حرارت و ازدیاد افت فشار می گردد. ون و دینگ[۹۹] با بررسی جریان آرام نانو سیال در لوله نتیجه گرفتند که بهبود ضریب انتقال حرارت در ناحیه ورودی بیشتر از ناحیه توسعه یافته میباشد و با حرکت در طول لوله این بهبود، روند کاهشی دارد. وینگ و همکاران[۱۰۰] به صورت آزمایشگاهی جریان آرام نانو سیالاتی که حاوی نانو ذراتی با پایه گرافیت بودند را بررسی کرده و نتیجه گرفتند که استفاده از نانو سیالات باعث افزایش ضریب انتقال حرارت می شود؛ اما این افزایش کمتر از مقداری است که توسط مدل های تئوری پیش بینی می گردد. تأثیر اندازه نانو ذرات بر انتقال حرارت در یک لوله افقی، توسط میرمعصومی و همکاران[۱۰۱] بررسی شده است. انتقال حرارت در این مقاله شامل دو مکانیزم جابهجایی اجباری و آزاد است. مشخص شده که با کاهش اندازه نانو ذرات، ضریب انتقال حرارت جابهجایی افزایش می یابد در حالی که ضریب اصطكاك تغيير قابل ملاحظهاي نمي كند. افت فشار و انتقال حرارت جابهجايي در جريان مغشوش و توسعه یافته نانو سیالهای Al2O3-آب و ZrO2-آب در داخل لوله توسط ویلیامز و همکاران[۸۲] مورد توجه قرار گرفته است. در این پژوهش مشخص گردید که اگر در محاسبه اعداد بیبعد رینولدز، ناسلت و پرانتل، از خواص نانو سیال که تابعی از دما هستند استفاده شود، می توان افت فشار و انتقال حرارت نانو سیال را با استفاده از رابطههای کلاسیک مربوط به سیال خالص محاسبه کرد. رعا و بونجورنو [۸۳] افت فشار و انتقال حرارت را در جریان نانو سیالهای Al2O₃-آب و ZrO₂-آب بررسی کرده و اعلام داشتند که نانو سیال یک سیال همگن است؛ بنابراین عدد ناسلت و افت فشار آن با استفاده از معادلات مربوط به سیال خالص قابل دستیابی است؛ مشروط بر آن که خواص نانو سیال به صورت تابعی از غلظت و دما در نظر گرفته شود. نظری و همکاران[۱۰۲] در یک تحقیق تجربی، افت فشار و عدد ناسلت در جریان مغشوش نانو سیال Al2O3-آب در داخل لوله را اندازه گیری کردند. آن ها نشان دادند که در غلظت ۲ درصد و رینولدز ۱۳۵۰۰، عدد ناسلت ۲۲ درصد افزایش می یابد. میناکوف و همکاران [۱۰۳] خواص نانو سیال را تابعی از دما و غلظت در نظر گرفته و به بررسی جریان نانو سیال در لوله پرداختند. جریان مغشوش در داخل لوله با شار حرارتی ثابت و تأثیر بالا بردن دمای ورودی نانو سیال به لوله به صورت آزمایشگاهی توسط لین و هو[۱۰۴] مورد مطالعه قرار گرفته و عنوان شده که با افزایش دما، نانو سیال عملکرد بهتری دارد؛ زیرا ویسکوزیته آن کم و ضریب هدایت حرارتی آن زیاد میشود. داس و همکاران[۱۰۵] جریان مغشوش مخلوط آب و ضد یخ و نانو ذراتی از جنس آلومینا و اکسید مس را به صورت عددی در لولههای تخت رادیاتور ماشین بررسی کردهاند. آنها متوجه شدند که با ثابت فرض کردن مقدار انتقال حرارت، در غلظت ۱ درصد از نانو ذره آلومینا، قدرت پمپاژ نسبت به حالتی که غلظت صفر باشد كاهش مى يابد.

۲-۴) شرح مسأله

مسأله مورد نظر، جریان آرام نانو سیال Al2O3-آب در لولهای به قطر ۴/۵ میلیمتر و طول ۱/۰۱ متر میباشد. دبی جریان مشخص بوده و جریان در لوله از نظر هیدرودینامیکی کاملاً توسعه یافته است. دیواره لوله در معرض شار حرارتی یکنواخت قرار دارد. در خروجی لوله شرط فشار ثابت برقرار است. جدول (۴–۱) شرایط جریان را نشان میدهد. رعا و بونجورنو[۸۳] این مسأله را به صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار دادند. آنها دمای متوسط سیال ورودی و خروجی را اندازه گرفتند. همچنین در فواصل ۵، ۲۰، ۴۲، ۴۸، ۹۸ و ۱۰۰ سانتیمتر از ابتدای لوله، دمای سطح و بر اساس آن ضریب انتقال حرارت جابهجایی را اندازه گیری کردند. در این پژوهش، ضریب انتقال حرارت جابهجایی در این هفت مقطع، برای رینولدزهای مختلف در ورودی لوله و غلظتهای حجمی ۲۰/۱۳، ۲۷۲۶/۰ و ۱۰/۰ به

غلظت نانو ذرات	عدد رينولدز	دبی حجمی (m³/s)	شار حرارتی (W/m²)	دمای ورودی (°C)
•/• ١٣٢	٨٧٠	•/••••\$1404	١٨٣۵٩	22/82
•/• ١٣٢	١٨٨٨	•/•••••₩٢١٧۶	٨٩٣٩	T 1/VT
•/•TV۶	٩٣٠	•/••••\$\$\$\$	7091V	22/96
•/• ٢٧۶	1171	•/••••\$9987	14.1.	21/16
• • 9	٨٨٧	•/••••\&\\&	47441	TD/8T
• • ۶	١٠٨٩	•/••••١٢٨٧•۴	31.56	20/26

جدول ۴-۱: شرایط جریان در لوله

رعا و بونجورنو افت فشار جریان نانو سیال را نیز در لولهای به قطر ۵/۸ میلیمتر و طول ۱/۴۵ متر و برای چند دبی حجمی و غلظت مختلف اندازه گیری کرده و نتیجه گرفتهاند که افت هد جریان از طریق معادله دارسی^۱ قابل محاسبه است. در این تحقیق افت فشار در لوله، برای هشت سرعت متوسط مشخص شده در جدول (۴–۱) محاسبه خواهد شد.

۴-۳) معادلات حاکم

فصل حہارم

همانطور که در بخش ۳–۵–۳ بیان گردید، در این پایاننامه از روش تکفازی همگن جهت شبیه سازی جریان نانو سیال استفاده می گردد؛ بنابراین معادلات حاکم بر مسأله، معادلات مربوط به جریان سیال تراکم ناپذیر در حالت پایا می باشند. با توجه به تقارن محوری مسأله، معادلات حاکم به صورت زیر هستند [۱۰۶, ۹۳].

معادله پيوستگي:

$$\frac{\partial \left(\rho_{nf} v_{x}\right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(\rho_{nf} v_{r}\right)}{\partial r} + \frac{\rho_{nf} v_{r}}{r} = 0$$
(1-4)

معادله مومنتم جهت شعاعی:

[\] Darcy Equation

$$\frac{1}{r}\frac{\partial(r\rho_{nf}v_{x}v_{x})}{\partial x} + \frac{1}{r}\frac{\partial(r\rho_{nf}v_{r}v_{x})}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}\left[r\mu_{nf}\left(2\frac{\partial v_{x}}{\partial x} - \frac{2}{3}\left(\nabla.\vec{V}\right)\right)\right] + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\mu_{nf}\left(\frac{\partial v_{x}}{\partial r} + \frac{\partial v_{r}}{\partial x}\right)\right]$$
(7-f)

معادله مومنتم جهت محورى:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial\left(r\rho_{nf}v_{x}v_{r}\right)}{\partial x} + \frac{1}{r}\frac{\partial\left(r\rho_{nf}v_{r}v_{r}\right)}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\mu_{nf}\left(2\frac{\partial v_{r}}{\partial r} - \frac{2}{3}\left(\nabla.\vec{V}\right)\right)\right] + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial x}\left[r\mu_{nf}\left(\frac{\partial v_{x}}{\partial r} + \frac{\partial v_{r}}{\partial x}\right)\right] - 2\mu_{nf}\frac{v_{r}}{r^{2}} + \frac{2}{3}\frac{\mu_{nf}}{r}\left(\nabla.\vec{V}\right) + \frac{\rho_{nf}v_{x}^{2}}{r}$$
(7-f)

معادله انرژي:

فصل جہارم

$$\frac{1}{r}\frac{\partial \left(r\rho_{nf}Cp_{nf}v_{r}T\right)}{\partial r} + \frac{\partial \left(\rho_{nf}Cp_{nf}v_{x}T\right)}{\partial x} = \frac{1}{r}\frac{\partial \left(rk_{nf}\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial \left(k_{nf}\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \mu_{nf}s_{v}}{\left(k_{nf}\frac{\partial T}{\partial x}\right) + \mu_{nf}s_{v}}$$
(F-F)

در معادله انرژی، s_v تلفات ویسکوز است و به صورت زیر تعریف می شود.

$$s_{v} = 2\left[\left(\frac{\partial v_{r}}{\partial r}\right)^{2} + \left(\frac{v_{r}}{r}\right)^{2} + \left(\frac{\partial v_{x}}{\partial x}\right)^{2}\right] + \left[\frac{\partial v_{r}}{\partial x} + \frac{\partial v_{x}}{\partial r}\right]^{2} - \frac{3}{2}\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{r}(rv_{r}) + \frac{\partial v_{x}}{\partial x}\right]^{2}$$

$$(\Delta - F)$$

در معادلات (۴–۱) تا (۴–۴)، لازم است خواص نانو سیال به صورت تابعی از دما مشخص شوند. شیوه محاسبه این خواص در بخش ۳-۳ توضیح داده شده است. ضریب هدایت حرارتی نانو سیال از ترکیب روابط (۳–۵) تا (۳–۷)، ویسکوزیته نانو سیال از ترکیب روابط (۳–۸) و (۳–۹)، چگالی نانو سیال از رابطه (۱-۳) و ظرفیت حرارتی ویژه نانو سیال از رابطه (۳-۲) به دست میآیند.

۴-۴) روش حل مسأله

ل حہارم

برای حل معادلات حاکم بر مسأله، از نرمافزار فلوئنت نسخه ۱۵ استفاده شده است. الگوریتم سیمپل برای ایجاد کوپلینگ بین سرعت و فشار و روش آپویند مرتبه دو جهت حل معادلات بقای جرم، مومنتم و انرژی استفاده میشود. فرض خواهد شد که پاسخها وقتی همگرا میشوند که میزان باقیماندهها کوچکتر از یک میلیونیوم باشند.

در این پایاننامه خواص نانو سیال تابع دما و غلظت نانو ذرات در نظر گرفته شدهاند. برای وارد کردن این خواص به نرم افزار فلوئنت، از توابع نوشته شده به زبان برنامه نویسی C که به 'UDF شهرت دارند استفاده شده است. همچنین جریان در تمامی قسمتهای لوله از نظر هیدرودینامیکی کاملاً توسعه یافته میباشد؛ بنابراین پروفیل سرعت در ورودی لوله به صورت سهمی است که آن را توسط UDF به نرمافزار

[\]User Define Function

وارد می کنیم. UDF نوشته شده برای شرط مرزی سرعت در ورودی، ویسکوزیته نانو سیال و ضریب هدایت حرارتی آن، در پیوست آمده است. با توجه به سادگی نسبی این مسأله از لحاظ هندسی، زمان مورد نیاز جهت انجام محاسبات کم است؛ بنابراین شبکه محاسباتی طوری در نظر گرفته شده که دارای سلولهای بسیار زیاد با اندازه بسیار کوچک باشد. شبکه محاسباتی دارای ۶۰۰۰۰ عدد سلول دو بعدی است. با کوچکتر کردن اندازه سلولها و افزایش تعداد آنها، تغییری در پاسخ ایجاد نمی شود.

شکل ۴-۱، روند همگرایی را برای حالتی که غلظت نانو ذرات ۰/۰۲۷۶ و عدد رینولدز ورودی ۹۳۰



میباشد، نشان میدهد.

شکل ۴-۱: روند همگرایی پاسخ- غلظت نانو ذرات ۰/۰۲۷۶ و عدد رینولدز ورودی ۹۳۰

ں حہارم

۴-۵) ارائه نتایج و بحث

۴-۵-۱) ضریب انتقال حرارت جابهجایی

شکلهای (۴–۱) و (۴–۲) امکان مقایسه ضریب انتقال حرارت جابهجایی محاسبه شده در پژوهش حاضر و اندازه گیری شده توسط رعا و بونجورنو [۸۳] را فراهم می سازند. در این شکلها، غلظت نانو ذرات برابر ۱۳۲۰/۰ است و هرکدام از شکلها مربوط به یک رینولدز ورودی خاص هستند. در این نمودارها ضریب انتقال حرارت جابهجایی در فواصل ۵، ۱۶، ۳۰، ۴۴، ۵۸، ۹۹ و ۱۰۰ سانتی متر از ابتدای لوله رسم شده است. کمیت **X**، نشان دهنده فاصله محوری از ابتدای لوله می باشد. همان طور که مشاهده



میشود، همخوانی خوبی بین مقادیر اندازه گیری شده و محاسبه شده وجود دارد.

شکل ۴-۲: ضریب انتقال حرارت جابه جایی در مقاطع مختلف لوله در رینولدز ورودی ۸۷۰ و غلظت ۱۳۲ ۰/۰



شکل ۴-۳: ضریب انتقال حرارت جابهجایی در مقاطع مختلف لوله در رینولدز ورودی ۱۸۸۸ و غلظت ۱۳۲ ۰/۰

شکلهای (۴-۳) و (۴-۴) ضریب انتقال حرارت جابه جایی محاسبه شده و اندازه گیری شده در غلظت

۰/۰۲۷۶ را برای دو رینولدز ورودی متفاوت نشان میدهند. با مشاهده این دو شکل مشخص می شود



که تفاوت بین مقادیر محاسبه شده و اندازه گیری شده ناچیز است.

مل جهارم

شکل ۴-۴: ضریب انتقال حرارت جابه جایی در مقاطع مختلف لوله در رینولدز ورودی ۹۳۰ و غلظت ۰/۰۲۷۶

٧٣



ىل جہارم

شکل ۴-۵: ضریب انتقال حرارت جابهجایی در مقاطع مختلف لوله در رینولدز ورودی ۱۱۳۱ و غلظت ۰/۰۲۷۶

در شکلهای (۴–۵) و (۴–۶) مقدار ضریب انتقال حرارت جابهجایی در هفت نقطه از لوله رسم شده است. در این شکلها غلظت نانو ذرات برابر ۱۰/۶ است. هر کدام از شکلها مربوط به یک رینولدز ورودی خاص هستند و امکان مقایسه مقادیر اندازه گیری شده توسط رعا و بونجورنو [۸۳] و مقادیر محاسبه شده در مطالعه حاضر را فراهم میسازند. همان طور که در شکلها دیده می شود، اختلاف بین مقادیر محاسبه شده و دادههای آزمایشگاهی کم است.



فصل جهارم

شکل ۴-۶: ضریب انتقال حرارت جابهجایی در مقاطع مختلف لوله در رینولدز ورودی ۸۸۷ و غلظت ۰/۰۶



شکل ۴-۲: ضریب انتقال حرارت جابهجایی در مقاطع مختلف لوله در رینولدز ورودی ۱۰۸۹ و غلظت ۰/۰۶

۴–۵–۲) افت فشار

هل جهارم

جدول ۳-۲ مقادیر افت فشارهای به دست آمده از طریق حل عددی و افت فشارهای محاسبه شده

به شیوه تحلیلی را برای حالات مختلف نشان میدهد. همان طور که مشخص است، نتایج به دست آمده

دقت بسیار بالایی دارند و حداکثر خطا در تمامی حالتها کمتر از ۱ درصد میباشد.

غلظت نانو ذرات	عدد رینولدز ورودی	دمای ورودی (°C)	افت فشار شبیهسازی (Pa)	افت فشار دارسی (Pa)
•/• ١٣٢	٨٧٠	22/22	488/1	487/91
•/• ١٣٢	١٨٨٨	T 1/VT	222	224/SV
•/• ٢٧۶	٩٣٠	22/98	887/•4	881/8A
•/•YV۶	١١٣١	21/16	۵۷۶/۹۲	۵۷۵/۷۶
• / • ۶	٨٨٧	20/82	5745/07	5240/07
• • ۶	١٠٨٩	20/VF	4798	4737/72

جدول ۴-۲: افت فشارهای به دست آمده از طریق شبیه سازی و حل تحلیلی

۴-۶) نتیجه گیری

در این فصل، جریان نانو سیال و انتقال حرارت در لولهای که جدار آن به طور یکنواخت حرارت می بیند، بررسی گردید. غلظتهای مختلفی از نانو سیال، تحت دبیهای مختلف در نظر گرفته شد. برای شبیه سازی نانو سیال، از روش تکفازی همگن استفاده گردید و خواص نانو سیال به صورت تابعی از دما و غلظت حجمی نانو ذرات در نظر گرفته شد. مسأله به شیوه عددی و با استفاده از نرم افزار فلوئنت نسخه ۱۵ حل گردید. مقادیر ضریب انتقال حرارت جابه جایی و افت فشار سیال محاسبه و با مقادیر آزمایشگاهی به دست آمده توسط رعا و بونجورنو [۸۳] مقایسه شد. در تمامی حالتها، اختلاف بین مقادیر محاسبه شده و دادههای به دست آمده از آزمایش ناچیز بوده و همخوانی بسیار خوبی بین مقادیر اندازه گیری شده توسط رعا و بونجورنو و مقادیر محاسبه شده در این پژوهش وجود دارد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که استفاده از روش همگن برای شبیهسازی نانو سیال مناسب است مشروط بر آن که

خواص نانو سیال به طور صحیح و به صورت متغیر با دما در نظر گرفته شوند.



ييان مسأله وروش حل ...

۵–۱) مقدمه

در پیل سوختی غشاء پلیمری، بیش از نصف انرژی هیدروژن در خلال واکنشهای الکتروشیمیایی که جهت تولید الکتریسیته انجام می گیرند، به گرما تبدیل می شود. این گرمای تولید شده باید به صورت مطلوب از پیل خارج شود. دفع ناصحیح گرما باعث کاهش کارایی و طول عمر مفید پیل خواهد شد. در حالت كلى پيلهاى سوختى غشاء پليمرى بزرگ توسط آب مايع خنك مىشوند. معمولاً اين آب مايع در کانالهای عبور جریان که در صفحات خنککاری ایجاد شدهاند به گردش در می آید. اولین وظیفه صفحات خنک کاری، کاهش دمای حداکثر و جلوگیری از افزایش غیر مجاز دمای پیل می باشد. به علاوه، صفحات خنک کاری باید با کاهش اختلاف دمای محلی، توزیع دمای یکنواختی را ایجاد کنند. در این پایاننامه، مسأله جریان سیال و انتقال حرارت در صفحات خنککاری با ابعاد ۱۸Cm×۱۸Cm به صورت عددی مورد مطالعه قرار می گیرد. از طریق شبیه سازی عددی، چهار طرح مختلف برای صفحات خنک کاری بررسی شده و از نظر پارامترهای حداکثر دمای سطح، یکنواختی دما در سطح و افت فشار مقایسه خواهند شد.

توزیع یکنواخت دما، از جمله مواردی است که جهت کنترل و عملکرد مطلوب پیل سوختی غشاء پلیمری حائز اهمیت ویژه میباشد. برای دستیابی به توزیع دمای یکنواخت در صفحات خنک کاری، تأثیر افزایش دبی سیال خنک کننده، تغییر در چینش کانالهای عبور سیال و تغییر نوع سیال خنک کننده بررسی خواهد شد. البته تغییر هر کدام از این پارامترها باعث تغییر در میزان افت فشار سیال و قدرت مورد نیاز جهت پمپاژ سیال خنک کننده می شود.

۵–۲) مدل هندسی

در این پایان نامه چهار صفحه خنک کاری مختلف در نظر گرفته شده است. شکل (۵–۱) این صفحات را نشان می دهد. این مدل ها شامل میدان جریان مارپیچی کلاسیک^۱ با ۵ کانال موازی (مدل A)، میدان مارپیچی چند مسیره^۲ با ۵ کانال موازی (مدل B)، میدان جریان مستقیم^۳ با ۴۵ کانال موازی (مدل C) و میدان حلزونی^۴ با ۵ کانال موازی (مدل D) می باشند. در شکل (۵–۱)، برای تشخیص بهتر مسیر جریان و امتداد کانال ها در هر کدام از میدان های جریان، یکی از کانال ها به رنگ آبی روشن در آمده است. در تمامی میدان های جریان در نظر گرفته شده، کانال های عبور جریان با فاصله کمی از یکدیگر قرار دارند. در این پایان نامه، مسأله جریان سیال و انتقال حرارت در این چهار صفحه خنک کاری مد نظر بوده و به شیوه عددی حل شده است.

مشخصات هندسی و فیزیکی صفحات خنککاری در جدول (۵-۱) آورده شده است. جنس صفحات نیز گرافیت میباشد.

[\] Conventional Serpentine Flow Field

^r Multi-Pass Serpentine Flow Field

^r Straight Flow Field

^{*} Spiral Flow Field

بيان سأله وروش حل



. فصل پنجم

شکل ۵-۱: طرحهای مختلف برای صفحه خنککاری

مشخصات هندسي صفحات خنككاري				
ابعاد صفحه	$\lambda \cdot \times \lambda \cdot \times mm^3$			
عرض كانال	۲ mm			
عمق كانال	\ mm			
قطر هيدروليكى كانال	۱/۳۳۳۳ mm			
مشخصات فيزيكي گرافيت				
چگالی	tta. kg/m ³			
ظرفیت گرمایی ویژه	۶۹۰ J/kg K			
ضریب هدایت حرارتی	۲۴ W/m K			

در این رساله، خنککاری پیل سوختی و مسأله جریان سیال و انتقال حرارت در چهار صفحه خنککاری با چهار سیال خنککننده مختلف بررسی می شود. اولین سیال آب و سه سیال بعدی، نانو سیال Al2O3-آب با غلظتهای ۰/۶، ۱/۲ و ۱/۸ درصد هستند.

۵-۳) شرایط مرزی

فصل پیجم

شکل (۵-۲) شماتیکی از هندسه استفاده شده برای شبیهسازی میدان جریان مارپیچی چند مسیره(مدل B) به همراه شرایط مرزی را نشان میدهد. البته در این شکل، مقیاس طولی رعایت نشده است. با توجه به متقارن بودن مسأله، فقط نصف صفحه مدل می شود. این هندسه دارای دو بخش سیال و جامد است. قسمتهای آبی رنگ نشان دهنده سیال و قسمتهای مشکی رنگ نشان دهنده بخش



جامد هستند.

شکل ۵-۲: هندسه استفاده شده برای شبیهسازی میدان جریان مارپیچی چند مسیره به همراه شرایط مرزی

با عنایت به تقارن مسأله و به منظور کاهش زمان محاسبات، فقط نصف صفحه مدل شده و در سطح مرکزی صفحه از شرط مرزی تقارن استفاده میشود. در سطح زیرین صفحه، شار حرارتی ثابت و برابر ۵۰۰۰ وات بر مترمربع در نظر گرفته شده است. این سطح را سطح شار حرارتی ثابت مینامیم. در حقیقت این شار حرارتی، بر اساس دفترچه راهنمای یک پیل سوختی واقعی که ساخت کمپانی سیستمهای تولید توان بالارد^۱ میباشد، در نظر گرفته شده است. بر اساس این دفترچه راهنما، پیلی با قدرت ۱۲۰۰ وات و سطح ۲۰۰۰ سانتیمتر مربع، در حین کار میزان ۱۶۵۰ وات حرارت تولید می کند. با در نظر گرفتن یک صفحه خنککاری به ازای سه تک پیل در این پایان امه، میزان شار حرارتی هرایی وات بر مترمربع به دست خواهد آمد. فرض شده انتقال حرارت از دیوارههای جانبی ناچیز است؛ بنابراین شرط حرارتی دیواره عایق در این قسمتها در نظر گرفته میشود.

آب و سه نانو سیال Al₂O₃-آب با غلظتهای ۱/۲، ۲/۶ و ۱/۸ درصد، چهار سیالی هستند که برای خنککاری در نظر گرفته شدهاند. برای تمام حالتها، دمای ورودی سیال ۴۰ درجه سلسیوس است. مسأله برای سه عدد رینولدز ورودی ورودی ۴۰۴، ۵۰۵ و ۶۰۶ در مدلهای A، B و D حل خواهد شد. با توجه به این که در مدل C تعداد کانالها ۹ برابر سایر مدلها است، فرض می شود عدد رینولدز ورودی ورودی در این مدل برابر ۴۵، ۵۶ و ۶۷ می باشد. با در نظر گرفتن این اعداد رینولدز ورودی برای مدل

^{&#}x27; Ballard Power Systems

همان طور که در فصل سوم بیان شد، در این رساله برای مدل کردن نانو سیال از روش همگن استفاده می شود. جریان سیال در صفحات خنک کاری پیل های سوختی آرام است. همچنین خنک کاری پیل در شرایط دائم بررسی می شود؛ بنابراین با فرض جریان آرام، دائم و تراکم ناپذیر، معادلات پیوستگی، مومنتم و انرژی به ترتیب با روابط (۵–۱)، (۵–۲) و (۵–۴) قابل بیان هستند [۱۰۶, ۱۰۲].

$$\nabla (\rho_{nt} \vec{V}) = 0 \tag{1-a}$$

$$\nabla (\rho_{nf} \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla (\bar{\tau}) \tag{7-a}$$

در معادله (۵–۲)، $\overline{ au}$ تانسور تنش است و به صورت زیر تعریف می شود.

$$\overline{\tau} = \mu_{nf} \left[\left(\nabla \vec{V} + \nabla \vec{V}^T \right) - \frac{3}{2} \nabla \vec{V} \, \vec{I} \right] \tag{(7-\Delta)}$$

در معادله (۵–۳)، \overline{I} تانسور همانی است.

فصل پنجم

۵-۴) معادلات حاکم

$$\rho_{nf} C p_{nf} \left[\vec{V} \cdot \nabla T \right] = \nabla \cdot \left[k_{nf} \nabla T \right]$$
(f- Δ)

فصل پیچم

سیال و k_{nf} ضریب هدایت حرارتی نانو سیال هستند. همانطور که در بخش ۳–۵–۳ بیان شد، برای شبیه سازی نانو سیال به روش همگن، می ایست خواص فیزیکی آن به صورت متغیر با دما در معادلات پیوستگی، مومنتم و انرژی وارد شوند. چگالی نانو سیال از رابطه (۳–۱)، ضریب هدایت حرارتی نانو سیال

از ترکیب روابط (۳–۵) تا (۳–۷)، ویسکوزیته نانو سیال از ترکیب روابط (۳–۸) و (۳–۹) و ظرفیت حرارتی ویژه نانو سیال از رابطه (۳–۲) به دست میآیند.

برای قسمتهای جامد، معادله حاکم رابطه انتقال حرارت هدایتی خالص است و با صفر قرار دادن بردار سرعت در رابطه (۵–۴) به دست میآید.

۵-۵) روش حل مسأله

مسأله با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی و توسط نرم افزار فلوئنت نسخه ۱۵ حل می شود. الگوریتم سیمپل برای ایجاد کوپلینگ بین سرعت و فشار و روش آپویند مرتبه دو جهت حل معادلات بقای جرم، مومنتم و انرژی استفاده می شود. فرض می شود که پاسخها وقتی همگرا می شوند که میزان باقی مانده ها کوچکتر از یک میلیونیوم باشند.

شکل ۵–۳، قسمتی از شبکه استفاده شده برای شبیهسازی میدان جریان مارپیچی چند مسیره را نشان میدهد. این شبکه داری سلولهای جامد و سلولهای سیال میباشد.





صل پیحم

همان طور که گفته شد، خواص نانو سیال تابع دما و غلظت نانو ذرات هستند، برای وارد کردن این خواص به نرم افزار فلوئنت از توابع نوشته شده به زبان برنامه نویسی C که به UDF شهرت دارند، استفاده می شود. UDF استفاده شده برای وارد کردن ویسکوزیته و ضریب هدایت حرارتی نانو سیال در پیوست آورده شده است.

به عنوان نمونه، شکل ۵–۴ روند همگرایی را برای میدان جریان مارپیچی چند مسیره برای حالتی که عدد رینولدز ورودی ۶۰۶ و غلظت نانو ذرات ۰/۰۰۶ میباشد، نشان میدهد. در این شکل میزان باقیماندههای حاصل از حل معادلات مومنتم در سه جهت اصلی مختصات و همچنین معادلات بقای جرم و انرژی نشان داده شده است.



شکل ۵-۴: روند همگرایی پاسخ در مدل B- غلظت نانو ذرات ۰/۰۰۶ و عدد رینولدز ورودی ۶۰۶



ارائه نبایج وبحث

۶-۱) عدم وابستگی نتایج عددی به شبکه محاسباتی

همان طور که در فصل پنجم بیان شد، به طور کلی در این رساله خواص سیال تابعی از دما در نظر گرفته شده است. به منظور اطمینان از صحت نتایج حل عددی، مسأله با آب و با خواص ثابت حل گردیده است. در این صورت امکان مقایسه برخی از نتایج با حل تحلیلی وجود دارد. در گام نخست استقلال حل عددی از شبکه برای چهار طرح مختلف صفحه خنککاری بررسی شده است. به عنوان نمونه شکل (۶–۱) نتایج حاصل از آزمایش استقلال از شبکه محاسباتی را برای میدان جریان مارپیچی کلاسیک (مدل A) در رینولدز ورودی ۴۰۴ نشان میدهد. در این شکل کمیتهای افت فشار و دمای



حداکثر بر حسب تعداد سلولهای شبکه محاسباتی رسم شدهاند.

A شکل 8-۱: نتایج بررسی استقلال نتایج حل از تعداد سلول های شبکه برای مدل
مطابق شکل (۶–۱)، در صورتی که سلولهای حجمی بیشتر از ۲۰۰۰۰۰ باشند، افت فشار و دمای حداکثر وابستگی بسیار کمی به تعداد شبکه دارند. بر این اساس، تعداد سلولهای بهینه برای مدل A برابر ۲۰۷۳۶۰۰ در نظر گرفته شده است. به همین صورت تعداد سلولهای بهینه برای سه شبکه محاسباتی دیگر مربوط به میدان جریان مارپیچی چند مسیره(مدل B)، میدان جریان مستقیم(مدل C) و میدان جریان حلزونی(مدل D) به ترتیب برابر ۴۱۹۳۶۰۰، ۱۵۹۵۶۰ و ۱۵۹۵۶۰۰ است.

۶-۲) اعتبار سنجی نتایج

فصل ششم

جهت اعتبار سنجی نتایج حاصل از حل عددی، کمیت ضریب اصطکاک دارسی و افت فشار به دست آمده برای کانالهای موازی(مدل C) با فرمولهای تحلیلی مقایسه شده است. شکل (۶–۲) این کمیتها

را در رینولدز ۴۵ نشان میدهد. باید توجه شود که کمیت x، معرف فاصله محوری از ابتدای کانال است.



شکل ۶-۶: ضریب اصطکاک و افت فشار در طول کانال برای مدل C در رینولدز ورودی ۴۵

مقدار ضریب اصطکاک در کانال از طریق رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$f = \frac{dp}{dx} \frac{D_h}{\rho u_m^{2}/2}$$
(۱-۶)
در این رابطه، D_h قطر هیدرولیکی است که در این مطالعه برابر ۱۳۳ ۲۰٬۰۰۰ متر میباشد. برای جریان
آرام و توسعه یافته در کانال مستطیلی با نسبت طول به عرض ۲، مقدار کمیت f. Re برابر ۶۲ است
(۱). همان طور که در شکل (۶–۲) نشان داده شده است، بر اساس نتایج حاصل از حل عددی در این
مطالعه، کمیت f. Re در ناحیه توسعه یافته به مقدار ۶۶ میرسد که با مقادیر تحلیلی مطابقت دارد.
بر اساس روش های حل تحلیلی، طول ناحیه در حال توسعه در جریان آرام سیال در داخل کانال از
رابطه زیر به دست میآید (۱).
 $L_e = D_h (0.05 \text{Re})$

نصل ششم

با توجه به این که عدد رینولدز ورودی جریان ۴۵ و قطر هیدرولیکی برابر ۱۳۳ ۰/۰۰ متر است، طول ناحیه ورودی از نظر تئوری برابر ۰/۰۰۳ متر خواهد بود. بر اساس حل عددی، طول ناحیه در حال توسعه حدود ۰/۰۰۳۵ متر استفاده شده است که با مقادیر تئوری همخوانی دارد.

به منظور وارسی دقت نتایج حل، میزان افت فشار به دست آمده از حل عددی در تمامی مدلها با مقادیر حاصل از حل تحلیلی مورد قیاس قرار گرفته است. افت فشار سیال در یک کانال افقی از رابطه زیر محاسبه می گردد.

$$\Delta P = \sum \frac{\rho k_l u_m^2}{2} + \frac{\rho f L u_m^2}{2D_h} \tag{(7-8)}$$

در این رابطه، ρ چگالی سیال، k_l ضریب افت موضعی، f ضریب اصطکاک دارسی، u_m سرعت متوسط جریان در داخل کانال، L طول کانال و D_h قطر هیدرولیکی است.

مقدار ضریب اصطکاک دارسی در کانالی با نسبت طول به عرض ۲ از رابطه زیر به دست میآید.
$$f = \frac{62}{\mathrm{Re}}$$
 (۴-۶)

برای خم ۹۰ درجه، مقدار ضریب افت موضعی از فرمول زیر استفاده می شود [۲].
$$k = 30 f$$



شکل ۶-۳: افت فشار عددی و تحلیلی بر حسب رینولدز ورودی برای مدل A





را برای مدل C به ازای عدد رینولدز ورودی ۶۷ نشان میدهد. در این شکل، x معرف فاصله محوری از

ورودی کانال است. همان طور که میدانیم عدد ناسلت، با رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$Nu = \frac{dT_m}{dx} \frac{\rho c_p u_m A_{ch} D_h}{k p_{ch} (T_s - T_m)}$$
(9-9)

[\] Mean Temperature

در این رابطه Ach مساحت سطح مقطع کانال و pch محیط آن می باشد. Tm نیز دمای میانگین جریان



در کانال بوده و از نظر تحلیلی با رابطه زیر محاسبه می شود.

شکل ۶-۵: مقادیردمای میانگین سیال، دمای متوسط سطح کانال و عدد ناسلت جریان در کانال برای مدل C به ازای عدد ۶۷

همان طور که در شکل (۶–۵) مشخص شده، پس از ناحیه ورودی گرمایی که حدود ۲/۰۰۴ متر است، عدد ناسلت به مقدار ۳/۷ میل می کند. از نظر تحلیلی مقدار عدد ناسلت در جریان آرام و توسعه یافته درون یک کانال مستطیلی با نسبت طول به عرض دو که شار حرارتی ثابت به جدار آن وارد می شود برابر ۴/۱۲ است. این مقدار با عدد ناسلت حاصل از شبیه سازی کمی تفاوت دارد. در واقع این اختلاف به آن دلیل است که در مسأله حاضر شار حرارتی وارد شده به سطح کانال کاملاً ثابت نیست. از نظر تحلیلی، طول ناحیه در حال توسعه حرارتی برای کانال مورد نظر را میتوان از رابطه زیر محاسبه کرد. $L_e = D_h (0.05 \,\mathrm{Re}\,\mathrm{Pr})$ (۸-۶)

در این رابطه، Pr عدد پرانتل است. عدد پرانتل برای آب در دمای ۴۰ درجه سلسیوس برابر ۴/۳ میباشد، لذا طول ناحیه ورودی گرمایی حدود ۰/۰۲ متر خواهد بود. این مقدار با طول ۰/۰۲۴ متر حاصل از شبیهسازی مطابق است.

همان طور که می دانیم در صورتی که شار حرارتی ثابت به جدار کانال اعمال شود، دمای میانگین

جریان در هر مقطع کانال با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$T_m(x) = T_{m,in} + \frac{q'' p_{ch}}{\dot{m}c_p} x \tag{9-8}$$

T_{m,in} دمای میانگین جریان در ورودی کانال است. از نظر تحلیلی میتوان دمای میانگین سیال در خروجی کانال را با استفاده از رابطه (۶–۹) محاسبه کرد. همچنین امکان محاسبه دمای میانگین در خروجی با استفاده از دادههای حاصل از شبیهسازی عددی و از طریق فرمول (۶–۷) وجود دارد. نتایج حاصله در جدول ۲–۱ موجود است.

مدل	عدد رینولدز ورودی	دمای میانگین عددی (°C)	دمای میانگین تحلیلی (^{C°})
D,B.A	4.4		
С	40	۲۸/۹۵ -	۱ /۲
D,B.A	۵۰۵		
C	۵۶	¥ 1/1 <i>7</i>	¥ 1/1
D,B.A	8.8		<u></u>
С	۶۷	771 • W	77

جدول ۶-۱: دمای میانگین جریان خروجی در تمام مدلها و تمام رینولدز ورودیها

مطابق جدول (۶–۱)، نتایج حاصل از حل عددی و تحلیلی کاملاً مطابق هستند که این مسأله نشان دهنده صحت توزیع سرعت و دما در مقطع عرضی کانال و همچنین بالانس انرژی در کل هندسه میباشد.

۶-۳) توزیع دما، فشار و ویسکوزیته نانو سیال در صفحات خنککاری

در این بخش، توزیع دما در سطح میانی کانالهای خنککاری، توزیع دما در سطح زیرین صفحه خنککاری، توزیع فشار در سطح میانی کانالهای خنککاری و تغییرات ویسکوزیته سیال در سطح میانی کانالهای خنککاری مورد بحث قرار خواهند گرفت. برای این منظور شکلهایی که نشاندهنده کمیتهای فوق هستند، در دو حالت رسم خواهد شد. در حالت اوّل، عدد رینولدز ورودی جریان برای مدل C برابر ۴۵ و برای مدلهای A، B و C مساوی ۴۰۴ بوده و غلظت نانو ذرات ۶/۰ درصد است. این مقادیر برابر با کمترین رینولدز ورودی و کمترین غلظت نانو سیال در این مطالعه هستند. در حالت دوم، عدد رینولدز ورودی جریان برای مدل C برابر ۶۷ و برای مدلهای A، B و C مساوی ۶۰۶ بوده و غلظت نانو ذرات ۸/۸ درصد است. این مقادیر برابر با بیشترین رینولدز ورودی و بیشترین غلظت نانو ذرات در این رساله هستند. به نظر می رسد که با افزایش غلظت نانو ذرات و یا با افزایش دبی جریان وضعیت خنککاری پیل سوختی بهبود یابد؛ بنابراین انتظار داریم بهترین وضعیت خنککاری را در بیشترین غلظت همراه با بیشترین دبی و بدترین وضعیت خنککاری را در کمترین غلظت و کمترین دبی داشته باشیم. حالات فوق بر همین اساس انتخاب شدهاند. با توجه به این که این شکلها مقدار دقیق هر کمیت در هر نقطه را مشخص نمیکنند(رنگها نشان می دهند که هر کمیت در چه بازهای قرار دارد)، تحلیل کمی نتایج با استفاده از آنها مشکل است. البته این شکلها امکان مقایسه کیفی چند حالت را فرآهم میآورند. همچنین با استفاده از آنها مشکل است. البته این شکلها امکان مقایسه کیفی چند حالت را فرآهم توزیع دما به خوبی امکان پذیر می شود.

شکلهای (۶–۶) و (۶–۷)، توزیع دما در سطح میانی صفحه خنککاری(سطح تقارن) را برای مدلهای مختلف نشان میدهند. همانطور که با مشاهده دو شکل مشخص است، به طور کلی دمای سیال با عبور از کانال و جذب حرارت افزایش مییابد بنابراین سیال، کمترین دما را در ورودی و بیشترین دما را در خروجی کانال دارا است. همچنین با افزایش عدد رینولدز ورودی و غلظت نانو ذرات، دمای خروجی کاهش مییابد.



شکل ۶-۶: توزیع دما بر حسب درجه سلسیوس در سطح میانی کانالهای خنککاری

عدد رینولدز ورودی جریان برای مدل C برابر ۴۵ و برای مدلهای A، B و D برابر ۴۰۴ – غلظت نانو ذرات ۶/۰ درصد



شکل ۶-۲: توزیع دما بر حسب درجه سلسیوس در سطح میانی کانالهای خنککاری

عدد رینولدز ورودی جریان برای مدل C برابر ۶۷ و برای مدلهای A، B و C برابر ۶۰۶ – غلظت نانو ذرات ۱/۸ درصد شکلهای (۶–۸) و (۶–۹)، توزیع دما در سطح زیرین صفحه خنککاری را نشان میدهند. همان طور که در قسمتهای قبل بیان شد، صفحات خنککاری در پیلهای سوختی وظیفه دارند با خارج کردن گرمای اضافی از پیل، مانع بالا رفتن دمای آن شوند و همچنین باید توزیع دما در ناحیه فعال را به حالت یکنواخت نزدیک کنند؛ بنابراین چگونگی توزیع دما در سطح صفحه خنککاری، مهم تر از توزیع دما در سایر قسمتهای آن است. به طور واضح مشخص است که میدان جریان مارپیچی چند مسیره(مدل B)،



ذرات و عدد رینولدز ورودی اختلاف دمای حداقل و حداکثر برای هر مدل کاهش مییابد.

فصل ششم

شکل ۶-۸: توزیع دما بر حسب درجه سلسیوس در سطح تقارن صفحات خنککاری

عدد رینولدز ورودی جریان برای مدل C برابر ۴۵ و برای مدلهای A، B و D برابر ۴۰۴ – غلظت نانو ذرات ۰/۶ درصد



شکل ۶-۹: توزیع دما در سطح تقارن صفحات خنک کاری عدد رینولدز ورودی جریان برای مدل C برابر ۶۷ و برای مدلهای A، B و D برابر ۶۰۶ – غلظت نانو ذرات ۱/۸ درصد در میدانهای جریان مستقیم و مارپیچی کلاسیک، یک گرادیان سراسری دما وجود دارد؛ به طوری که دما در اطراف ناحیه ورودی پایینتر و در اطراف ناحیه خروجی بالاتر است. میدان جریان حلزونی، نسبتاً توزيع دماي يكنواختي را ارائه ميدهد.

شکلهای (۶–۱۰) و (۶–۱۱)، توزیع فشار در کانالهای خنککاری را نشان میدهند. مدل C به

دلیل دارا بودن کانالهای مستقیم و کوتاهتر بودن طول مسیر جریان و همچنین تعداد بیشتر کانال

نسبت به سایر مدلها افت فشار کمتری را ایجاد میکند. از آنجا که توان مصرفی پمپ گردش سیال



خنک کننده از توان تولیدی توده پیل تأمین می گردد، لازم است افت فشار در صفحات خنک کاری تا

فصل ششم

شکل ۶-۱۰: توزیع فشار بر حسب پاسکال در کانالهای صفحات خنککاری

عدد رینولدز ورودی جریان برای مدل C برابر ۴۵ و برای مدلهای A، B و D برابر ۴۰۴ – غلظت نانو ذرات ۰/۶ درصد



شکل ۶-۱۱: توزیع فشار بر حسب پاسکال در کانالهای صفحات خنککاری عدد رینولدز ورودی جریان برای مدل C برابر ۶۷ و برای مدلهای A، B و C برابر ۶۰۶ – غلظت نانو ذرات ۱/۸ درصد چنان که در قسمتهای قبل گفته شد، ویسکوزیته نانو سیال در این رساله تابع دما و غلظت در نظر گرفته شده است. شکلهای (۶–۱۲) و (۶–۱۳)، تغییرات ویسکوزیته نانو سیال در سطح میانی کانالهای خنککاری را نشان میدهند. نانو سیال با حرکت در داخل کانال حرارت را از قسمتهای جامد دریافت می کند بنابراین دمای آن افزایش مییابد. این افزایش دما، کاهش ویسکوزیته را به دنبال دارد. با مقایسه



شکل ۶-۱۲: تغییرات ویسکوزیته نانو سیال بر حسب پاسکال ثانیه در سطح میانی کانالهای صفحات خنککاری عدد رینولدز ورودی جریان برای مدل C برابر ۴۵ و برای مدلهای A، B و D برابر ۴۰۴ – غلظت نانو ذرات ۶/۶ درصد





۶-۴) نتایج حل عددی و بحث پیرامون آنها

به منظور تحلیل نتایج حاصل از حل عددی و همچنین فراهم کردن امکان مقایسه بین حالات مختلف در نظر گرفته شده برای خنککاری پیل سوختی، دادههای به دست آمده از حل عددی بر حسب کمیتهای مهم که بر عملکرد پیل سوختی غشاء پلیمری تأثیر دارند بیان خواهند شد. این کمیتها شامل میزان افت فشار سیال خنککننده در صفحات خنککاری، مΩ، دمای حداکثر در سطح زیرین صفحه خنککاری، Tmar، دمای حداقل در سطح زیرین صفحه خنککاری، Tmin، یکنواختی دما در سطح شار حرارتی ثابت، Ut و اختلاف دمای حداکثر و دمای حداقل در سطح شار حرارتی ثابت، Δ۲، هستند. در این پایاننامه تأثیر پارامترهایی چون عدد رینولدز ورودی، هندسه و غلظت نانو ذرات بر این کمیتها مورد مطالعه قرار خواهد گرفت.

برای کمی سازی میزان یکنواختی دما، پارامتر شاخص یکنواختی دما ٔ به صورت زیر تعریف می شود.

$$U_{t} = \frac{\int \left| T - T_{avg} \right| dA}{\int A}$$
 (1.- \mathcal{F})

که T_{avg} دمای متوسط سطح است و از رابطه زیر قابل محاسبه است.

فصل شثم

$$T_{avg} = \frac{\int T dA}{\int \int A}$$
(11-9)

A مساحت سطح است و دو انتگرال بالا در سطح شار حرارتی ثابت محاسبه میشوند. در واقع شاخص یکنواختی دما، میزان انحراف دمای نقاط مختلف سطح از دمای متوسط را نشان میدهد بنابراین در صورتی که توزیع دما در سطح کاملاً یکنواخت باشد، مقدار این کمیت برابر صفر خواهد بود. جهت ارزیابی کیفی نتایج حاصل از خنککاری پیل در تمامی حالتهای در نظر گرفته شده در این تحقیق، کمیتهایی که در مدیریت گرما و خنککاری پیل مهم هستند محاسبه و در جداول (۶-۲) تا (۶-۳) آورده شدهاند. در بخشهای بعد از اعداد موجود در این جداول جهت ارزیابی حالات مختلف

[\] Temperature Uniformity Index

φ	$T_{max}(^{\circ}C)$	$T_{\min}(^{\circ}C)$	ΔT (°C)	T _{ave} (°C)	U_t (°C)	ΔP (Pa)
•	84/40	41/22	4./92	87/87	٩/٧٢	とまた /LL
• • • ۶	VV/TT	41/48	۳۵/۷۴	۵٩/٩	۸/۴۵	3/769
•/• 17	۲۲/۴	41/47	۳•/۹۸	۵۷/۳۶	۷/۲۸	5426/18
•/•1٨	۶۸	۴١/٣٨	78/87	۵۵/۰۴	8/22	۲۶۱۰ /۸۸

جدول ۶-۲: دادههای مربوط به مدل A در رینولدز ورودی ۴۰۴

جدول ۶-۳: دادههای مربوط به مدل A در رینولدز ورودی ۵۰۵

φ	T _{max} (°C)	$T_{min}(^{\circ}C)$	ΔT (°C)	T _{ave} (°C)	U_t (°C)	ΔP (Pa)
•	۷۴/۵۶	۴١/۵	۳۳/۰۶	۵۸/۵۱	V/VV	40/21
• • • ۶	۷٠/۳۵	41/40	۲۸/۹	۵۶/۲٩	8/V8	۵۳۸۸/۰۵
•/•17	88/4V	41/41	۲۵/•۶	54/25	۵/۸۳	VTV7/7
•/•18	۶۲/۹۵	41/21	۲١/۵٨	۵۰	$\Delta/\Upsilon Y$	1.777/4

جدول ۶-۴: دادههای مربوط به مدل A در رینولدز ورودی ۶۰۶

φ	$T_{max}(^{\circ}C)$	$T_{min}(^{\circ}C)$	ΔT (°C)	Tave (°C)	U_t (°C)	ΔP (Pa)
•	۶٩/۲۷	F1/FX	TV/V9	۵۵/۷۴	۶/۴۸	۵۱۲۰/۹
• • • ۶	۶۵/۷۴	41/44	26/2	۵۳/۸۸	۵/۶۳	۶۹۳۰
•/•17	۶۲/۳۸	41/4	۲•/۹٨	۵۲/۱۵	۴/٨۶	9447/8
•/•1٨	69/49	41/30	11/14	۵·/۶۱	4/10	١٣١١٨/٨

جدول ۶-۵: دادههای حاصل از حل عددی مربوط به مدل B در رینولدز ورودی ۴۰۴

Pa)
۱/۹
۱/۹
٩/٩
۱/۹
। ৭ १

φ	T _{max} (°C)	$T_{min}(^{\circ}C)$	ΔT (°C)	T _{ave} (°C)	U_t (°C)	ΔP (Pa)
•	۷۸/۵۴	44/78	34/42	۶۶/۵۸	4/8	3890/1
• / • • ۶	۱ ۳/۹۷	۴۳/۸۷	٣•/١	۶۳/۳۵	٣/٩۵	۵۰۱۰/۵
•/•17	१९/१८	43/21	78/11	۶۰/۲۸	٣/٣۴	89 • 9/7
•/•1٨	۶۵/۵۹	42/11	22/62	57/44	۲/۸۱	9891/4

جدول P-۶: دادههای حاصل از حل عددی مربوط به مدل B در رینولدز ورودی P-8

جدول P-۶: دادههای حاصل از حل عددی مربوط به مدل B در رینولدز ورودی P-۶

φ	T _{max} (°C)	$T_{min}(^{\circ}C)$	ΔT (°C)	T _{ave} (°C)	U_t (°C)	ΔP (Pa)
•	۷۲/۹۸	47/9	۲٩/• N	82/29	٣/٧٨	4714/6
• • • ۶	۶٩/۰۴	43/20	20/61	۵٩/ ٧ ٩	37/20	8498
•/• 17	۶۵/۱۳	47/22	۲١/٩١	۵۷/۱۱	۲/۷۴	Λ۹۱۵/V
•/• 18	۶۱/V	47/92	۱۸/۷۸	54/89	۲/۳	12614/6

جدول $^{+}$. دادههای حاصل از حل عددی مربوط به مدل C در رینولدز ورودی $^{+}$

φ	T _{max} (°C)	$T_{min}(^{\circ}C)$	ΔT (°C)	Tave (°C)	$U_t(^{\circ}C)$	ΔP (Pa)
•	۸۲/۲ I	۴ ٣/٣٨	۳۸/۸۳	83/13	۹/۷۸	87/89
• • • ۶	٧٧/٠٨	42/•1	34/1	۶۰/۴۵	٨/۵٢	44/48
•/•17	V7/۳V	FT/VX	۲٩/۵٩	$\Delta V / \mathfrak{R}$	۷/۳۵	۶١/۵
•/• ١٨	۶۸/۰۶	42/21	۲۵/۵۵	۵۵/۷۳	۶/۳	٨۶/۵

جدول P- اد دادههای حاصل از حل عددی مربوط به مدل C در رینولدز ورودی P

φ	$T_{max}(^{\circ}C)$	$T_{min}(^{\circ}C)$	ΔT (°C)	T _{ave} (°C)	$U_t(^{\circ}C)$	ΔP (Pa)
•	۷۴/۵	47/98	31/24	۵٩/١۶	۷/۸۶	42/19
• • • ۶	٧٠/٣٩	47/V	TV/89	۵۷	۶/۵۵	۵۸/۴۲
•/• 17	8818	42/40	24/10	۵۵/۰۲	۵/۹۲	۸۰/۴
•/• ١٨	83/14	47/21	۲ • /۹۳	۵۳/۲	۵/۱	117/0

φ	T _{max} (°C)	$T_{\min}(^{\circ}C)$	ΔT (°C)	T _{ave} (°C)	U_t (°C)	ΔP (Pa)
•	१९/४१	47/87	TF/F9	۵۶/۵۱	۶/۵٨	۵۳/۹
• • • ۶	۶۵/۹۲	47/44	22/49	۵۴/۷	۵/۷۴	۷۲/۶۵
•/• 17	87/VD	47/21	۲۰/۵۴	۵۳/۰۴	۴/۹۷	٩٩/۵
•/•1٨	۵۹/۸۵	47	۱۷/۸۵	۵۱/۵۱	۴/۲۷	۱۳۸/۸۹

جدول 9 -۱۰: دادههای حاصل از حل عددی مربوط به مدل C در رینولدز ورودی 9

جدول F۰۴: دادههای حاصل از حل عددی مربوط به مدل D در رینولدز ورودی ۴۰۴

φ	T _{max} (°C)	$T_{min}(^{\circ}C)$	ΔT (°C)	T _{ave} (°C)	U_t (°C)	ΔP (Pa)
•	۹۸/۵۷	48/21	۵۲/۲۶	۸۳/۸۴	٧/•٨	228/61
• / • • ۶	۹ • /۳۷	40/01	۴۴/۸	$\gamma\gamma/\lambda$ ۵	۶/۱۴	32247
•/• 17	$\lambda \gamma / \lambda \gamma$	44/92	۳٧/٩	۲ ۲/۳۲	۵/۲۳	4611/1
•/•18	$V\Delta/\Lambda Y$	44/22	۳١/۵	8V/TT	4/38	۶۶۰۵

جدول P-۲۱: دادههای حاصل از حل عددی مربوط به مدل D در رینولدز ورودی D

φ	T _{max} (°C)	$T_{min}(^{\circ}C)$	ΔT (°C)	Tave (°C)	$U_t(^{\circ}C)$	ΔP (Pa)
•	۸۶/۲۶	40/42	4.14	VF/XF	۵/۶	8881/18
• • • ۶	V 9/V9	46/71	۳۴/۹۸	$\vee \cdot / \cdot \vee$	۴/۸۳	4611/1
•/• ١٢	۲۳/۲ ۱	44/20	۲۸/9۶	۶۵/۳۵	۴	۶۴۴۴/۹
•/•١٨	۶۷/V	43/18	22/96	۶١/٣	$\mathfrak{r}/\mathfrak{r}$	9144/8

جدول P-۶۰ دادههای حاصل از حل عددی مربوط به مدل D در رینولدز ورودی P

φ	$T_{max}(^{\circ}C)$	$T_{min}(^{\circ}C)$	ΔT (°C)	T _{ave} (°C)	$U_t(^{\circ}C)$	ΔP (Pa)
•	VV/۴۸	ff/VX	۳۲/۷	۶۸/۵۱	4/21	4407/8
• • • ۶	۷۱/۸۴	44/78	$YY/\Delta A$	84/39	r/λ	۶·۷۷/۹
•/• 17	88/98	۴۳/۸	23/18	۶۰/۷۸	٣/١٨	8411/4
•/•1٨	87/24	47/21	$\Lambda / \Lambda V$	۵۷/۳۳	$r/\Delta v$	11444

۶-۴-۲) مقایسه عملکرد آب و نانو سیال در صفحات خنککاری مختلف

شکلهای (۶–۱۹)، (۶–۱۵) و (۶–۱۹) به ترتیب کمیتهای شاخص یکنواختی دما، اختلاف دمای حداقل و حداکثر و افت فشار را برای مدل A نشان می دهند. شکلهای (۶–۱۹) تا (۶–۱۹) به ترتیب کمیتهای فوق را برای مدل B، شکلهای (۶–۲۰) تا (۶–۲۲) به ترتیب همین کمیتها را برای مدل C و شکلهای (۶–۲۳) تا (۶–۲۵) به ترتیب کمیتهای مذکور را جهت مدل D نشان می دهند. تمامی Iین شکلها با استفاده از دادههای موجود در جداول (۶–۲) تا (۶–۱۳) رسم شدهاند. با بررسی این شکلها تأثیر عدد رینولدز ورودی و غلظت نانو ذرات بر کمیتهای شاخص یکنواختی دما، اختلاف دما

با مشاهده شکلهای (۶–۱۴) تا (۶–۲۵) به روشنی مشخص است که با افزایش غلظت نانو ذرات، کمیتهای U_t و ΔT کاهش و Δp افزایش مییابد. به طوری که در خصوص مدل A در هر کدام از رینولدزهای ورودی، با افزایش غلظت به میزان ۶/۰ درصد، U_t حدود ۱۳ درصد کاهش، ΔT حدود ۱۳ درصد کاهش و Δp حدود ۵۳ درصد افزایش مییابد. این بهبود در خصوص تمامی مدلهای در نظر گرفته شده قابل مشاهده است.

با مطالعه هرکدام از چهار سیال در نظر گرفته شده مشخص می شود با افزایش رینولدز ورودی U_t با مطالعه U_t و U_t و U_t افزایش می یابد. به طوری که اگر سیال خنک کننده آب باشد، با Δ میتهای U_t و Δ T و U_t کاهش و Δ P افزایش رینولدز ورودی از ۴۰۴ به ۶۰۶، U_t حدود ۳۳ درصد کاهش، Δ T حدود ۳۲ درصد کاهش و Δ P

حدود ۷۷ درصد افزایش مییابد. حال اگر سیال خنک کننده نانو سیال با غلظت ۱/۸ درصد باشد، با افزایش رینولدز ورودی از ۴۰۴ به ۶۰۶، U_t ۶۰۶ حدود ۳۳ درصد کاهش، Δ۲ حدود ۳۲ درصد کاهش و Δ حدود ۷۲ درصد افزایش مییابد؛ بنابراین افزایش دبی در نانو سیال تأثیر بهتری از افزایش دبی در آب دارد زیرا کاهش U_t به ازای افرایش کمتری در Δp به دست خواهد آمد.

با بررسی شکلهای (۶–۱۴)، (۶–۱۵)، (۶–۱۷)، (۶–۱۷)، (۶–۲۰)، (۶–۲۲)، (۶–۲۳)، (۶–۲۳) و (۶–۲۴) مشخص می شود که در تمامی مدلهای در نظر گرفته شده و در رینولدزهای بالا، در تمامی غلظتها میزان وابستگی اختلاف دما و شاخص یکنواختی دما به رینولدز کاهش می یابد و این در حالی است که به ازای هر غلظت، رابطه افزایش عدد رینولدز ورودی و افزایش افت فشار تقریباً خطی است. دلیل انحراف کوچک رابطه افت فشار و عدد رینولدز از حالت خطی، تغییرات ویسکوزیته نانو سیال با دما است. در صورتی که خواص نانو سیال گذرنده از کانال ثابت باشد و با تغییرات دما تغییر نکند، رابطه افت فشار و عدد رینولدز در جریان آرام خطی خواهد بود.



شکل ۶-۴: نمودار شاخص یکنواختی دما بر حسب عدد رینولدز ورودی برای مدل A به ازای تمامی غلظتها



شکل ۶-۱۵: نمودار اختلاف دمای حداکثر و حداقل بر حسب عدد رینولدز ورودی برای مدل A به ازای تمامی غلظتها



شکل ۶-۴: نمودار افت فشار بر حسب عدد رینولدز ورودی برای مدل A به ازای تمامی غلظتها



شکل ۶-۱۷: نمودار شاخص یکنواختی دما بر حسب عدد رینولدز ورودی برای مدل B به ازای تمامی غلظتها



شکل ۶-۱۸: نمودار اختلاف دمای حداکثر و حداقل بر حسب عدد رینولدز ورودی برای مدل B به ازای تمامی غلظتها



شکل ۶-۱۹: نمودار افت فشار بر حسب عدد رینولدز ورودی برای مدل B به ازای تمامی غلظتها



شکل ۶-۲۰: نمودار شاخص یکنواختی دما بر حسب عدد رینولدز ورودی برای مدل C به ازای تمامی غلظتها



شکل ۶-۲۱: نمودار اختلاف دمای حداکثر و حداقل بر حسب عدد رینولدز ورودی برای مدل C به ازای تمامی غلظتها



شکل ۶-۲۲: نمودار افت فشار بر حسب عدد رینولدز ورودی برای مدل C به ازای تمامی غلظتها



فصل شثم

شکل ۶-۲۳: نمودار شاخص یکنواختی دما بر حسب عدد رینولدز ورودی برای مدل D به ازای تمامی غلظتها



شکل ۶-۲۴: نمودار اختلاف دمای حداکثر و حداقل بر حسب عدد رینولدز ورودی برای مدل D به ازای تمامی غلظتها



شکل ۶-۲۵: نمودار افت فشار بر حسب عدد رینولدز ورودی برای مدل D به ازای تمامی غلظتها

در محدوده غلظتها و رینولدزهای در نظر گرفته شده، افزایش رینولدز و یا افزایش غلظت نانو ذرات باعث بالا رفتن ضریب انتقال حرارت جابهجایی و در نتیجه خنککاری بهتر می شود. به عنوان مثال در مدلC با افزایش غلظت نانو ذرات از ۰ به ۱/۸ درصد، ضریب انتقال حرارت جابهجایی در ناحیه توسعه یافته حرارتی به طور متوسط به میزان ۹ درصد افزایش می یابد.

به منظور ارزیابی عملکرد نانو سیال و آب، میزان ضریب انتقال حرارت جابهجایی در ناحیه توسعه یافته حرارتی در افت فشار یکسان مقایسه شده است. در یک افت فشار معین، استفاده از نانو سیال ضریب انتقال حرارت جابهجایی بالاتری را نسبت به آب به دستمی دهد. به عنوان نمونه، در مدل C و در افت فشار ۵۳/۹ پاسکال، در صورتی که از آب استفاده کنیم، ضریب انتقال حرارت جابهجایی برابر در افت فشار ۱۴۳۹/۸ پاسکال، در صورتی که از آب استفاده کنیم، ضریب انتقال حرارت جابهجایی برابر

بود. این مقادیر بیانگر بهبود ۲/۲ درصدی ضریب انتقال حرارت جابهجایی هستند.

در خصوص مدلهای A، B و D به دلیل چینش خاص کانالهای عبور جریان در صفحات خنک کاری، شار حرارتی که به هر کانال وارد می شود با شاری که به سایر کانالها وارد می گردد متفاوت است. به عنوان نمونه در مدل A، شار حرارتی خالص متوسط که به جدار ۱۵ سانتیمتر اولین کانال (مسیری که در شکل (۵–۱) به رنگ آبی روشن در آمده) وارد می شود برابر ۴۸۴۱ W/m² است. این شار در آخرین کانال (مسیری که بیشترین فاصله با اولین کانال را دارد) به ۶۲۹۳ W/m² می رسد. در واقع در هر مدل، سیال خنک کننده در کانالهای مجاور دارای دمای متفاوتی است. لذا علاوه بر جریان کلی حرارت که از سطح زیرین صفحه خنک کاری به سمت کانالها وجود دارد، بین سیال در کانالهای هم جوار نیز انتقال حرارت صورت می گیرد. این انتقال حرارت می تواند باعث یکنواخت تر شدن توزیع دما در سطح زیرین صفحات خنک کاری شود.

با توجه به متفاوت بودن شار حرارتی وارد شده به جدار هر کانال و تفاوت دمای سیال در نقاط متناظر در کانالهای مختلف و به با عنایت به این موضوع که خواص سیال تابعی از دما میباشد، می توان دریافت که در کانالهای جریان ضریب انتقال حرارت جابهجایی نمی تواند ثابت باشد. در حقیقت این ضریب در هر کانال به صورت محیطی و طولی تغییر کرده و در نقاط مختلف یکسان نیست. اما تغییرات محیطی آن نسبت به تغییرات طولی کمتر بوده و می توان برای هر مقطع کانال یک ضریب انتقال حرارت جابهجایی متوسط تعریف کرد. به منظور یک مقایسه کلی در عملکرد آب و نانو سیال از نظر میزان ضریب انتقال حرارت جابهجایی در مسیرهای عبور جریان، اولین مسیر و آخرین مسیر از مدل A را در نظر گرفته و میزان این ضریب را در افت فشارهای یکسان مطالعه می کنیم.

در مقطعی که در فاصله ۶ سانتیمتر از اولین کانال قرار دارد، در حالتی که افت فشار برابر ۲۰۸/۶ Pa باشد، در صورت استفاده از آب ضریب انتقال حرارت جابهجایی متوسط مقطع برابر ۱۹۶۱/۳ W/m² و در صورت استفاده از نانو سیال با غلظت ۲۰۰/۶ این ضریب برابر W/m² دمای میانگین برابر ۵° ۴۰/۸۵ و در صورت استفاده از نانو سیال با غلظت ۲۰۰/۶ این ضریب برابر ۲۰⁹ Y/m² و دمای میانگین برابر ۵° ۴۱/۲۵ خواهد بود. این مقادیر نشان میدهند که ضریب انتقال حرارت جابهجایی متوسط مقطعی که در فاصله جابه برابر ۲۰۰۶

از اولین کانال قرار دارد، در افت فشار ۴۰۴ Pa، در صورت استفاده از نانو سیال بهبود ۲/۲ درصدی ضریب انتقال حرارت جابهجایی نسبت به آب مشاهده میشود. در این حالت دمای میانگین مقطع برای آب C ۴۲/۴۱ و برای نانو سیال C ۴۲/۷۶ است. در افت فشارهای متناظر، در مقاطع ۶ و ۱۵ سانتیمتر از آخرین کانال بهبود ضریب انتقال حرارت جابهجایی به ترتیب ۱/۹ و ۲/۱ درصد میباشد. با توجه به موارد مطرح شده در این بخش، به کارگیری نانو سیال به عنوان خنک کننده باعث بهبود پارامترهای دمایی که بر بازده و طول عمر مفید پیل تأثیر دارند میشود. از این رو، استفاده از نانو سیال جهت خنک کاری پیلهای سوختی غشاء پلیمری توصیه می گردد. پیش بینی میشود در آینده اندازه پیلهای سوختی کاهش یافته و عدد رینولدز جریان در کانالهای خنک کاری کمتر شود. کاهش عدد رینولدز تأثیر نامطلوبی بر خنک کاری پیل دارد اما استفاده از نانو سیال به عنوان راهی جهت بهبود خنک کاری پیل سوختی غشاء پلیمری مطرح خواهد بود.

۶-۴-۲) مقایسه عملکرد صفحات خنککاری مختلف با نانو سیال

به منظور مقایسه عملکرد مدلهای مختلف صفحه خنککاری، نتیجه کار کلیه صفحات با نانو سیال در غلظت ۶/۴ درصد با یکدیگر مقایسه میشود. باید در نظر داشت در مقام مقایسه عملکرد صفحات خنککاری با یکدیگر، نوع سیال خنککننده چندان مؤثر نیست و نتایج کلی یکسان خواهد بود. توضیح این که اگر یکی از صفحات با آب عملکرد بهتری نسبت به صفحه دیگر داشته باشد، با نانو سیال هم عملکرد بهتری خواهد داشت.

همان طور که در جداول (۶–۲) تا (۶–۱۳) مشخص است، دمای حداکثر پیل به ازای تمام حالتها در محدوده ایمن نگه داشته می شود.

شکلهای (۶–۲۶) تا (۶–۲۸)، شاخص یکنواختی دما را برای تمامی حالات در نظر گرفته شده در این مطالعه نشان داده و امکان مقایسه بین آنها را فراهم می آورند. همان طور که در این شکل مشخص است، میدان جریان مارپیچی چند مسیره دارای شاخص یکنواختی دمای پایین است. دلیل این موضوع، جینش و ساختار ویژه کانالها در این طرح است. در میدانهای جریان مستقیم و مارپیچی کلاسیک، یک گرادیان سراسری دما وجود دارد به طوری که دما در اطراف ناحیه ورودی پایین تر و در اطراف ناحیه خروجی بالاتر است. میدان جریان حلزونی، نسبتاً توزیع دمای یکنواختی را ارائه میدهد. در تمامی رینولدزهایی که در این مطالعه در نظر گرفته شده است، به طور متوسط میزان شاخص یکنواختی دما در سطح برای مدل B حدود ۵۸ درصد این کمیت در مدلهای A و C و حدود ۸۳ درصد این پارامتر در مدل D است. این موضوع نشانگر عملکرد مطلوب میدان جریان مارپیچی چند مسیره میباشد. میدان جریان حلزونی از نظر میزان شاخص یکنواختی دما در رده دوم قرار دارد اما میزان دمای متوسط و دمای حداکثر سطح برای ان بیشتر از سایر مدلها است. میدانهای جریان مارپیچی کلاسیک(مدل A) و موازی مستقیم(مدل C)، از نظر میزان یکنواختی دما عملکرد مشابهی دارند.



فصل شثم

شکل ۶-۶: شاخص یکنواختی دما در تمام غلظتها-مدلهای A,B,D: رینولدز ورودی ۴۰۴ و مدل C: رینولدز ۴۵



شکل ۶-۲۷: شاخص یکنواختی دما در تمام غلظتها-مدلهای A,B,D: رینولدز ورودی ۵۰۵ و مدل C: ورودی ۵۶



شکل ۶-۲۸: شاخص یکنواختی دما در تمام غلظتها-مدلهای A,B,D: رینولدز ورودی ۶۰۶ و مدل C: رینولدز ۶۷

شکلهای (۶-۲۹) تا (۶-۳۱) به منظور مقایسه اختلاف دمای حداکثر و حداقل در سطح زیرین صفحه خنککاری، ΔT، در مدلهای مختلف رسم شدهاند. با مشاهده شکلها به روشنی دیده می شود که اختلاف دمای حداکثر و دمای حداقل سطح در همه مدلها با افزایش رینولدز ورودی و یا با افزایش غلظت نانو ذرات کاهش می یابد. همچنین در غلظتهای بالا، پارامتر ΔT برای تمامی مدلها به یک عدد میل میکند. این عدد به میزان عدد رینولدز وابسته است. در میان چهار مدل در نظر گرفته شده در این رساله، میدان جریان حلزونی(مدل ΔT (D) بالاتری نسبت به سایر مدلها دارد. این عملکرد نامناسب میدان جریان حلزونی در غلظتها و رینولدزهای پایین، پررنگ تر می شود. به عنوان نمونه در غلظت ۶/۰ درصد و کمترین رینولدز در نظر گرفته شده در این مطالعه، میزان ΔT برای مدل D، به طور متوسط حدود ۲۷ درصد از سایر مدلها بالاتر است. در سه میدان جریان دیگر، کمیت ΔT دارای مقادیری نزدیک به هم میباشد. با استفاده از دادههای جداول (۶-۲) تا (۶-۱۳)، مشخص است به ازای تمامی غلظتها و رینولدز ورودیها، میزان دمای متوسط و دمای حداکثر سطح برای مدل D از سایر مدلها بالاتر است.



شکل ۶-۲۹: اختلاف دمای حداکثر و حداقل- مدلهای A,B,D: رینولدز ورودی ۴۰۴ و مدل C: رینولدز ورودی ۴۵



شکل ۶-۳۰: اختلاف دمای حداکثر و حداقل- مدلهای A,B,D: رینولدز ورودی ۵۰۵ و مدل C: رینولدز ورودی ۵۶



شکل ۶-۳۱: اختلاف دمای حداکثر و حداقل- مدلهای A,B,D: رینولدز ورودی ۶۰۶ و مدل C: رینولدز ورودی ۶۷

شکلهای (۶-۳۲) تا (۶-۳۴)، افت فشار ایجاد شده در کانالهای خنک کاری مختلف را نشان میدهند. همان طور که در این شکلها دیده می شود میدان جریان مستقیم افت فشار بسیار کمتری نسبت به سایر مدل ها دارد زیرا در این مدل، سیال در کانال هایی مستقیم، با طول نسبی کم جریان پیدا می کند. از سوی دیگر تعداد کانالها در مدل موازی مستقیم ۹ برابر تعداد کانالها در سایر مدلهایی است که در این مطالعه در نظر گرفته شدهاند. سایر میدانهای جریان از نظر میزان افت فشار تقریباً عملکرد مشابهی دارند. مثلاً در بالاترین رینولدز در نظر گرفته شده در این مطالعه، افت فشار برای مدلهای A تا D به ترتیب برابر ۶۹۳۰، ۶۹۳۶، ۷۳ و ۶۰۷۸ پاسکال میباشد. به علاوه در هر مدل، میزان افت فشار با افزایش رینولدز و یا ازدیاد غلظت نانو ذرات افزایش می یابد. همان طور که مشخص است رابطه افت فشار در کانالهای خنککاری و غلظت نانو ذرات خطی نبوده و در غلظتهای بالا، افزایش غلظت تأثیر بیشتری در افزایش افت فشار دارد. دلیل این موضوع آن است که ویسکوزیته نانو سیال به صورت نمایی با غلظت تغییر می کند.



شکل ۶-۳۲؛ افت فشار در تمام غلظتها-مدلهای A,B,D: رینولدز ورودی ۴۰۴ و مدل C: رینولدز ورودی ۴۵



شکل ۶-۳۳؛ افت فشار در تمام غلظتها-مدلهای A,B,D؛ رینولدز ورودی ۵۰۵ و مدل C؛ رینولدز ورودی ۵۶



شکل ۶-۴۳؛ افت فشار در تمام غلظتها-مدلهای A,B,D رینولدز ورودی ۶۰۶ و مدل C: رینولدز ورودی ۶۷

۶-۵) نتیجهگیری

در این پایاننامه خنک کاری پیل سوختی غشاء پلیمری به روش عددی بررسی شده است. پیلهای سوختی با توان نسبتاً بالا با استفاده از مایع خنک می شوند. معمولاً این مایع در کانال های عبور جریان که در صفحات خنککاری قرار دارند جریان مییابد. خنککاری پیل باید به گونهای انجام شود که اولاً دما در پیل در بازه مشخصی قرار گیرد و ثانیا دما تا حد امکان در نقاط مختلف یکسان باشد. جهت بررسی عملکرد حرارتی یک صفحه خنککاری پارامترهایی چون اختلاف دمای حداکثر و دمای حداقل در سطح صفحه خنککاری ΔT و شاخص یکنواختی دما در سطح صفحه خنککاری Ut تعریف می شوند. شاخص یکنواختی دما نشان دهنده میزان یکنواختی متوسط دما در نقاط مختلف سطح میباشد. علاوه بر اهمیت پارامترهای دمایی، علاقهمندیم که افت فشار ایجاد شده در صفحات خنک کاری کم باشد. کمیتهای دمایی و افت فشار تأثیر مستقیمی بر بازده پیل سوختی غشاء پلیمری دارند. در محدوده در نظر گرفته شده در این پایاننامه نقش کمیتهای دمایی بر بازده پیل بیشتر از تأثیر افت فشار است. از سوی دیگر این پارامترهای دمایی بر طول عمر مفید پیل نیز تأثیر می گذارند. لذا اهمیت کمیتهای دمایی بیشتر از افت فشار میباشد.

همانند همه وسایلی که به خنککاری احتیاج دارند مایلیم خنککاری در پیل سوختی به بهترین شکل ممکن صورت گیرد. بهبود وضعیت خنککاری با تغییر هندسه صفحات خنککاری، تغییر سیال خنککننده و تغییر در شرایط جریان(عدد رینولدز) ممکن خواهد بود. در این رساله چهار صفحه
خنککاری مختلف در نظر گرفته شده است. این مدلها شامل میدان جریان مارپیچی کلاسیک با ۵ کانال موازی(مدل A)، میدان مارپیچی چند مسیره با ۵ کانال موازی(مدل B)، میدان مستقیم با ۴۵ کانال موازی(مدل C) و میدان حلزونی با ۵ کانال موازی(مدل D) میباشند. بررسی تأثیر نوع سیال خنککننده با در نظر گرفتن آب و نانو سیال Al₂O₃-آب با غلظتهای ۲۰۱۲، ۲۰۱۲ و ۲۰۱۸ به انجام رسیده است. موضوع به ازای سه رینولدز ورودی مختلف بررسی شده است. در تمامی این رینولدزها

فصل ششم

جهت شبیه سازی نانو سیال از روش همگن به همراه خواص متغیر نانو سیال بهره گیری شده است. خواص نانو سیال به صورت تابعی از دما و غلظت نانو ذرات در نظر گرفته شده است. به منظور وارسی دقت روش در نظر گرفته شده در شبیه سازی نانو سیال، مسأله جریان آرام نانو سیال Al₂O₃-آب در کانالی که جدار آن به صورت یکنواخت حرارت می بیند توسط نرم افزار فلوئنت حل شده است. چندین غلظت و رینولدز ورودی مختلف در نظر گرفته شده و نتایج با داده های تجربی مقایسه گشته اند. در تمامی این رینولدزها جریان آرام است. نتایج حاکی از آن است که این روش شبیه سازی نانو سیال دارای دقت بالایی است.

با حل مسأله نتايج زير حاصل مىشود.

دمای حداکثر پیل به ازای تمام حالتها در محدوده ایمن نگه داشته می شود.

جریان آرام میباشد.

۲) با افزایش غلظت نانو ذرات، کمیتهای U_t و ΔT کاهش و Δp افزایش مییابد. به طوری که در خصوص میدان جریان مارپیچی کلاسیک(مدل A) در هر کدام از رینولدزها، با افزایش غلظت به میزان P درصد، U_t حدود ۲۳ درصد کاهش، ΔT حدود ۱۳ درصد کاهش و Δp حدود ۳۵ درصد افزایش می یابد.

لصل ششم

- (۳) با مطالعه هرکدام از چهار سیال در نظر گرفته شده مشخص میشود با افزایش رینولدز ورودی (T + T) کمیتهای U_t و $T\Delta$ کاهش و Δ افزایش مییابد. به طوری که اگر سیال خنک کننده آب باشد، با افزایش رینولدز ورودی از ۲۰۴ به ۲۰۶ یا حدود ۳۳ درصد کاهش، Δ حدود ۳۳ درصد کاهش افزایش رینولدز ورودی از ۲۰۴ به ۲۰۶ میابد. حال اگر سیال خنک کننده نانو سیال با غلظت ۱/۸ درصد و Δ حدود ۳۲ درصد کاهش، Δ حدود ۳۲ درصد کاهش می باشد، با افزایش رینولدز ورودی از ۲۰۴ به ۲۰۶ یا حدود ۳۳ درصد کاهش، Δ حدود ۳۲ درصد کاهش کامش می باشد، با افزایش می باید. حال اگر سیال خنک کننده نانو سیال با غلظت ۱/۸ درصد و Δ حدود ۳۲ درصد افزایش می باید. حال اگر سیال خنگ کننده نانو سیال با کلطت کار درصد کاهش می باشد، با افزایش رینولدز ورودی از ۲۰۴ به ۲۰۶ به ۲۰۶ مال حدود ۳۳ درصد کاهش، حدود ۳۲ درصد کاهش و Δ
- ۴) اختلاف دمای حداکثر و دمای حداقل سطح در همه مدلها با افزایش رینولدز ورودی و یا با افزایش غلظت نانو ذرات کاهش مییابد. همچنین در غلظتهای بالا، پارامتر ΔT برای تمامی مدلها به یک عدد میل می کند. این عدد به میزان عدد رینولدز ورودی وابسته است. در میان چهار مدل در نظر گرفته شده، میدان جریان حلزونی ΔT بالاتری نسبت به سایر مدلها دارد. در سه میدان جریان دیگر کمیت ΔT دارای مقادیری نزدیک به هم میباشد.

- ۵) برای تمامی مدلها، در رینولدزهای بالاتر میزان وابستگی اختلاف دما و شاخص یکنواختی دما به رینولدز ورودی کاهش مییابد.
- ۶) میدان جریان مارپیچی چند مسیره(مدل B) دارای شاخص یکنواختی دمای پایین است در تمامی رینولدزهایی که در این مطالعه در نظر گرفته شده است، به طور متوسط میزان شاخص یکنواختی دما در سطح برای میدان جریان مارپیچی چند مسیره(مدل B) حدود ۵۸ درصد این کمیت در میدانهای جریان مارپیچی کلاسیک(مدل A) و موازی مستقیم(مدل C) و حدود ۳۸ درصد این بیدانهای میدانهای جریان مارپیچی کلاسیک(مدل A) و موازی مستقیم(مدل C) و حدود ۳۸ درصد این بیدان میدان جریان مارپیچی چند مسیره(مدل B) حدود ۵۸ درصد این کمیت در میدانهای جریان مارپیچی کلاسیک(مدل A) و موازی مستقیم(مدل C) و حدود ۳۸ درصد این بیدانهای جریان مارپیچی کلاسیک(مدل A) و موازی مستقیم(مدل C) و حدود ۳۸ درصد این بیدان جریان میدانهای جریان حلزونی(مدل C) است. این موضوع نشانگر عملکرد مطلوب میدان جریان مارپیچی چند مسیره میباشد. میدان جریان حلزونی از نظر میزان شاخص یکنواختی دما در رده مارپیچی چند مسیره میباشد. میدان جریان حلزونی از نظر میزان شاخص یکنواختی دما در رده ای میدان درای میدان دمای متوسط و دمای حداکثر سطح برای آن بیشتر از سایر مدلها است.
 ۷) میدان جریان میزان دمای متوسط و دمای حداکثر سطح برای آن بیشتر از سایر مدلها است.
- ۸) در یک افت فشار معین، استفاده از نانو سیال ضریب انتقال حرارت جابهجایی بالاتری را نسبت به آب به دست میدهد. در خصوص میدان جریانهای مارپیچی کلاسیک(مدل A)، مارپیچی چند مسیره(مدل B) و حلزونی(مدل D)، به دلیل چینش خاص کانالهای عبور جریان در صفحات خنککاری، شار حرارتی که به هر کانال وارد میشود با شاری که به سایر کانالها وارد می گردد متفاوت است. در واقع در هر مدل، سیال خنککننده در کانالهای مجاور دارای دمای متفاوتی

است. لذا علاوه بر جریان کلی حرارت که از سطح زیرین صفحه خنک کاری به سمت کانالها وجود دارد، بین سیال در کانالهای هم جوار نیز انتقال حرارت صورت می گیرد. این انتقال حرارت می تواند باعث یکنواخت تر شدن توزیع دما در سطح زیرین صفحات خنک کاری شود. با توجه به متفاوت بودن شار حرارتی وارد شده به جدار هر کانال و تفاوت دمای سیال در نقاط متناظر در کانالهای مختلف و به با عنایت به این موضوع که خواص سیال تابعی از دما می باشد، می توان دریافت که در کانالهای جریان ضریب انتقال حرارت جابه جایی نمی تواند ثابت باشد. در حقیقت این ضریب در هر کانال به صورت محیطی و طولی تغییر کرده و در نقاط مختلف یکسان نیست. در تمامی مدل ها استفاده از نانو سیال باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابه جایی می شود.

با توجه به موارد مطرح شده در این بخش، به کارگیری نانو سیال به عنوان خنک کننده باعث بهبود پارامترهای دمایی که بر بازده و طول عمر مفید پیل تأثیر دارند میشود. از این رو، استفاده از نانو سیال جهت خنک کاری پیلهای سوختی غشاء پلیمری توصیه می گردد. همچنین همان طور که گفته شد، استفاده از نانو سیال میتواند باعث کوچک تر شده اندازه رادیاتور در سیستم خنک کاری پیل و حذف فیلتر یونزدا گردد. پیشبینی میشود در آینده اندازه پیلهای سوختی کاهش یافته و عدد رینولدز ورودی جریان در کانالهای خنک کاری کمتر شود. کاهش عدد رینولدز تأثیر نامطلوبی بر خنک کاری پیل دارد اما استفاده از نانو سیال به عنوان راهی جهت بهبود خنک کاری پیل سوختی غشاء پلیمری

مطرح خواهد بود.

از بین چهار مدل مورد نظر برای صفحه خنک کاری، میدان جریان موازی مستقیم (مدل C) کمترین افت فشار را ایجاد می کند اما عملکرد خنک کاری این مدل باعث مردود شدن آن در قیاس با سایر مدل ها می شود. در میان طرحهای در نظر گرفته شده در این مطالعه، میدان جریان مارپیچی چند مسیره (مدل B) از نظر پارامترهای خنک کاری بهترین عملکرد را دارد. همچنین میزان افت فشار در مدل های مختلف تفاوت چندانی با یکدیگر ندارد؛ بنابراین میدان جریان مارپیچی چند مسیره به عنوان بهترین مدل در میان چهار مدل در نظر گرفته شده در این مطالعه معرفی می گردد. استفاده از این میدان جریان و نانو سیال به عنوان خنک کننده ما را به نتایج مطلوبی جهت خنک کاری پیل سوختی غشاء پلیمری خواهد رساند.

۶-۶) پیشنهادات پژوهشی

جهت ادامه پژوهش در خصوص خنککاری پیلهای سوختی غشاء پلیمری موارد زیر پیشنهاد میگردد:

- ۱) در نظر گرفتن چند میدان جریان دیگر برای خنککاری پیل سوختی غشاء پلیمری و مقایسه نتایج
 ۱) با این تحقیق
- ۲) استفاده از روش دو فازی برای شبیهسازی نانو سیال و حل مسأله حاضر با این روش و مقایسه

نتايج با اين تحقيق

- ۳) استفاده از نانو سیالهای مختلف به عنوان سیال خنک کننده در پیل سوختی و مقایسه نتایج با این تحقیق
- ۴) بررسی توزیع نامتقارن دبی سیال در کانالهای عبور جریان در صفحات خنک کاری و تلاش جهت

بهینه سازی عملکرد هر یک از صفحات خنک کاری با توزیع نامتقارن دبی سیال خنک کننده

۵) بررسی تأثیر شکل و یا ابعاد کانالها در خنککاری پیل سوختی

فصل ششم

- ۶) در نظر گرفتن پیل سوختی و صفحات خنککاری به عنوان یک مجموعه واحد و بررسی تأثیر استفاده از نانو سیال به عنوان سیال خنککننده بر بازده پیل سوختی
- ۷) حل مسألهای مشابه با تحقیق حاضر با این تفاوت که شار حرارتی وارد شده به سطح صفحه

خنک کاری ثابت در نظر گرفته نشود و متناسب با تغییر چگالی جریان در پیل تغییر کند.

پوس**ت** **

UDF نوشته شده برای ویسکوزیته، ضریب هدایت حرارتی و شرط مرزی سرعت نانو سیال در ورودی لوله

#include "udf.h"

```
/* UDF for Viscosity mu */
```

DEFINE_PROPERTY(Cell_Viscosity, Cell_index, thread){

/* phi needs to be set to the correct value */

real phi = ;

real mu_nf; /* this is the end result */

real mu_w; /* intermediary result */

real t = C_T(cell_index, thread);

 $mu_w = 2.414e-5 * pow(10, 247.8 / (t - 140));$

 $mu_nf = mu_w * exp(4.91*phi / (0.2092 - phi));$

return mu_nf;

```
}
```

/* UDF For Thermal Conductivity c */

DEFINE_PROPERTY(Cell_Thermal_Conductivity, Cell_index, thread){

/* phi needs to be set to the correct value */
real phi = ;
real k_nf; /* this is the end result */
real k_w; /* intermediary result */
/* get the temperature of the cell */

real $t = C_T(cell_index, thread);$

real tstar = t / 298.15; k_w = 0.6065 * (-1.48445 + 4.12292 * tstar - 1.63866 * tstar * tstar); k_nf = k_w * (1 + 4.5503 * phi);

return k_nf;

}

DEFINE_PROFILE(X_Velocity,thread,nv)

{

float x[3]; /* An Array For The Coordinates */

float y;

face_t f; /* f is a face thread index */

begin_f_loop(f, thread)

{

F_CENTROID(x,f,thread);

y = x[1];

real vm; /* vm is the average speed at the entrance */

F_PROFILE(f, thread, nv)

= vm*(1.-y*y/(.00225*.00225));

}

```
end_f_loop(f, thread)
```

}



- [1] Hashmi S.M.H. (2010) "Cooling strategies for PEMFC stacks" PhD. Thesis, Helmut Schmidt University, Hamburg, Germany.
- [2] Park J. and Xianguo L. (2006) "Effect of flow and temperature distribution on the performance of a PEM fuel cell stack" *Journal of Power Sources*, 162, 1, pp. 444-459.
- [3] Promislow K. and Wetton B. (2005) "A simple, mathematical model of thermal coupling in fuel cell stacks" *Journal of Power Sources*, 150, pp. 129-135.

- [5] Al-Asad D.K.A. (2006) "The design and evaluation of a water delivery system for evaporative cooling of a proton exchange membrane fuel cell" MSc. Thesis, Texas A&M University.
- [6] Islam M. R. Shabani B. Rosengaten G. and Andrews J. (2015) "The potential of using nanofluids in PEM fuel cell cooling systems: A review" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, pp. 523-539.
- Sharaf O.Z. and Orhan M.F. (1014) "An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, pp. 810-853.
- [8] Anderson R. Zhanga L. Dinga Y. Blancoa M. and Bia X. (2010) "A critical review of two-phase flow in gas flow channels of proton exchange membrane fuel cells" *Journal of Power Sources*, 195, 15, pp. 4531-4553.
- [9] Xianguo L. (2006) "Principles of fuel cells" Taylor and Francis, New York, pp. 572.
- [10] Mench M. M. (2008) "Fuel cell engines" John Wiley & Sons Inc, New York, pp. 528.
- [11] O'Hayre R.P. Cha S.W. Colella W. and Prinz F. B. (2006) "Fuel cell fundamentals" John Wiley & Sons Inc, New York, pp.290-292.
- [12] Wang Y. Chen K.S. Mishler J. Cho S. C. and Adroher X. C. (2011) "A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: technology, applications, and needs on fundamental research" *Applied Energy*, 88, 4, pp. 981-1007.

- [13] Wen C.Y. Lin Y.S. Lu C. H. and Luo T. W. (2011) "Thermal management of a proton exchange membrane fuel cell stack with pyrolytic graphite sheets and fans combined" *International Journal of Hydrogen Energy*, 36, 10, pp. 6082-6089.
- [14] Yu S. and Jung D. (2010) "A study of operation strategy of cooling module with dynamic fuel cell system model for transportation application" *Renewable Energy*, 35, 11, pp. 2525-2532.
- [15] Boyd B. and Hooman K. (2012) "Air-cooled micro-porous heat exchangers for thermal management of fuel cells" *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39, 3, pp. 363-367.
- [16] Lopez-Sabiron. A. M. Barroso J. Roda V. Barranco J. Lozano A. and Barreras F. (2012) "Design and development of the cooling system of a 2 kw nominal power open-cathode polymer electrolyte fuel cell stack" *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 8, pp. 7289-7298.
- [17] Hu P. Cao G.Y. Zhu X.J. and Hu M. (2010) "Coolant circuit modeling and temperature fuzzy control of proton exchange membrane fuel cells" *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 17, pp. 9110-9123.
- [18] Li H. Tang Y. Wang Z. Shi Z. Wu S. Song D. Zhang J. Fatih K. Zhang J. Wang H. Liu Z. Abouatallah R. and Mazza A. (2008) "A review of water flooding issues in the proton exchange membrane fuel cell" *Journal of Power Sources*, 178, 1, pp.103-117.
- [19] Chen H. Pei P. and Song M. (2015) "Lifetime prediction and the economic lifetime of proton exchange membrane fuel cells" *Applied Energy*, 142, pp. 154-163.
- [20] Beuscher U. Cleghorn S.J. and Johnson W.B. (2005) "Challenges for PEM fuel cell membranes" *International journal of energy research*, 29, 12, pp. 1103-1112
- [21] Gode P, Ihonen J, Strandroth A, Ericson H, Lindbergh G, Paronen M, Sundholm F. Sundholm G. and Walsby N. (2003) "Membrane durability in a PEM fuel cell studied using pvdf based radiation grafted membranes" *Fuel Cells*, 3, 1-2, pp. 21-27.
- [22] Maher A.R. and Al-Baghdadi S. (2009) "A CFD study of hygro-thermal stresses distribution in pem fuel cell during regular cell operation" *Renewable Energy*, 34, 3, pp. 674-682.

- [23] Snyder L.E. (2006) "A feasibility study of internal evaporative cooling for proton exchange membrane fuel cells" Texas A&M University.
- [24] Larminie J. Dicks A. and McDonald M.S. (2009) "Fuel cell systems explained" John Wiley & Sons Ln., New York.
- [25] Kandlikar S.G. and Lu Z. (2009) "Thermal management issues in a PEMFC stack-a brief review of current status" *Applied Thermal Engineering*, 29, 7, pp. 1276-1280.
- [26] Lasbet Y. Auvity B. Castelain C. and Peerhossaini H. (2006) "A chaotic heatexchanger for PEMFC cooling applications" *Journal of Power Sources*, 156, 1, pp.114-118.
- [27] Lampinen M.J. and Fomino M. (1993) "Analysis of free energy and entropy changes for half-cell reactions" *Journal of the Electrochemical Society*, 140, 12, pp.3537-3546.
- [28] Goebel S.G. (2005) "Evaporative cooled fuel cell" US Patent 6960404.
- [29] Owejan J. P. Owejan J. E. Tighe T. W. Gu W. and Mathias M. (2007) "Investigation of fundamental traansport mechanism of product water from cathode catalyst layer in PEMFCs" ASME/JSME 2007 5th Joint Fluids Engineering Conference, *American Society of Mechanical Engineers*, pp. 1361-1367
- [30] Owejan J.P. Owejan J.E. Gu W. Trabold T.A. Tighe T.W. and Mathias M.F.
 (2010) "Water transport mechanisms in pemfc gas diffusion layers" *Journal of The Electrochemical Society*, 157, 10, pp. B1456-B1464.
- [31] Chen F.C. Gao Z. Loutfy R.O. and Hecht M. (2003) "Analysis of optimal heat transfer in a pem fuel cell cooling plate" *Fuel Cells*, 3, 4, pp.181-188.
- [32] Choi J. Kim Y.H. Lee Y. Lee K.J. and Kim Y. (2008) "Numerical analysis on the performance of cooling plates in a PEFC" *Journal of mechanical science and technology*, 22, 7, pp. 1417-1425.
- [33] Shahsavari S. Desouza A. Bahrami M. and Kjeang E. (2012) "Thermal analysis of air-cooled PEM fuel cells" *International Journal of Hydrogen Energy*, 37, 23, pp. 18261-18271.

- [34] Wen C.Y. and Huang G.W. (2008) "Application of a thermally conductive pyrolytic graphite sheet to thermal management of a PEM fuel cell" *Journal of Power Sources*, 178, 1, pp.132-140.
- [35] Zhang J. Xie Z. Zhang J. Tang Y. Song C. Navessin T. Shi Z. Song D. Wang H. Wilkinson D. Liu Z.S. and Holdcroft S. (2006) "High temperature PEM fuel cells" *Journal of Power Sources*, 160, 2, pp. 872-891.
- [36] Flückiger R. Tiefenauer A. Ruge M. Aebi C. Wokaun A. and Büchi F.N. (2007)
 "Thermal analysis and optimization of a portable, edge-air-cooled PEFC stack" *Journal of Power Sources*, 172, 1, pp. 324-333.
- [37] Wen C.Y. Lin Y.S. and Lu C.H. (2009) "Performance of a proton exchange membrane fuel cell stack with thermally conductive pyrolytic graphite sheets for thermal management" *Journal of Power Sources*, 189, 2, pp. 1100-1105.
- [38] Burke K.A. (2008) "Advanced fuel cell system thermal management for NASA exploration missions" *Sixth International Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit* (IECEC), Cleveland, Ohio.
- [39] Vasiliev L. and Vasiliev Jr. L. (2008) "Heat pipes in fuel cell technology" Mini-Micro Fuel Cells: Springer, pp. 117-124.
- [40] Vasiliev L.L. Filatova O. and Vasiliev Jr. L. (2009) "Heat pipes- good tool for fuel cells thermal management" *International Symposium on Convective Heat and Mass Transfer in Sustainable Energy* (CONV-09), Hammamet, Tunisia.
- [41] Choi K.S. Kim H.M. Yoon H.C. Forrest M.E. and Erickson P.A. (2008) "Effects of ambient temperature and relative humidity on the performance of nexa fuel cell" *Energy Conversion and Management*, 49, 12, pp.3505-3511.
- [42] Adzakpa K. P. Ramousse J. Dubé Y. Akremi H. Agbossou K. Dostie M. Poulin A. and Fournier M. (2008) "Transient air cooling thermal modeling of a PEM fuel cell" *Journal of Power Sources*, 179, 1, pp. 164-176.
- [43] Baek S.M. Yu S.H. Nam J.H. and Kim C.J. (2011) "A numerical study on uniform cooling of large-scale PEMFCs with different coolant flow field designs" *Applied Thermal Engineering*, 31, 8, pp. 1427-1434.
- [44] Asghari S. Akhgar H. and Imani B.F. (2011) "Design of thermal management subsystem for a 5kw polymer electrolyte membrane fuel cell system" *Journal of Power Sources*, 196, 6, pp. 3141-3148.

- [۴۵] شریعتی ز. افشاری الف. (۱۳۹۳) "بررسی عملکرد میدانهای مختلف جریان خنککاری با کانالهای موازی در پیل سوختی غشا پلیمری" مجله علمی پژوهشی مکانیک سازهها و شارهها، دوره ۴، شماره ۳، ص. ۱۲۱–۱۰۹
- [46] Lee J.H. (2005) "Coolant flow field design for fuel cell stacks" US Patents 6924052.
- [47] Lasbet Y. Auvity B. Castelain C. and Peerhossaini H. (2007) "Thermal and hydrodynamic performances of chaotic mini-channel: application to the fuel cell cooling" *Heat Transfer Engineering*, 28, 8-9, pp. 795-803.
- [48] Ravishankar S. and Prakash K.A. (2014) "Numerical studies on thermal performance of novel cooling plate designs in polymer electrolyte membrane fuel cell stacks" *Applied Thermal Engineering*, 66, 1-2, pp. 239-251.
- [49] Gould B.D. Ramamurti R. Osland C.R. and Swider-Lyons K.E. (2014) "Assessing fuel-cell coolant flow fields with numerical models and infrared thermography" *International Journal of Hydrogen Energy*, 39, 26, pp.14061-14070.
- [50] Shimei S. and Wei L. (2014) "Heat management of proton exchange membrane fuel cell" *Thermal Energy and Power Engineering*, 3, 1, pp. 171-174.

[۵۱] افشاری الف. شریعتی ز. (۱۳۹۳) "بررسی استفاده از فوم فلزی به عنوان توزیع کننده سیال خنککاری در پیل سوختی غشا پلیمری" نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی، دوره ۴، شماره ۲، ص. ۳۱–۲۰

- [52] Brambilla M. and Mazzucchelli G. (2004) "Fuel cell with cooling system based on direct injection of liquid water" US Patent 6835477.
- [53] Garrity P.T. Klausner J.F. and Mei R. (2007) "A flow boiling microchannel evaporator plate for fuel cell thermal management" *Heat Transfer Engineering*, 28, 10, pp.877-884.
- [54] Oseen-Senda K.M. Lundell F. Hillenbach A. and Pauchet J. (2007) "The cooling of PEFC with pentane boiling in minichannels: a study of flow instabilities using neutron radiography visualization" *Heat Transfer Engineering*, 28, 1, pp.49-57.
- [55] Irnie Azlin Z. Zeno M. Hanapi S. Najmi W.A. and Mohamed W. (2014) "Thermal and electrical experimental characterization of ethylene glycol and water mixture

coolants for a 400 W proton exchange membrane fuel" *Applied Mechanics and Materials*, Trans Tech Publ, pp. 641 - 646.

- [56] Chol S. (1995) "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles" ASME-Publications-Fed, 231, pp. 99-106.
- [57] Wang X.Q. and Mujumdar A.S. (2008) "A review on nanofluids-part i: theoretical and numerical investigations" *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2, 4, pp. 613-630.
- [58] Singh A. (2008) "Thermal conductivity of nanofluids" *Defence Science Journal*, 58, 5, 600-607.
- [59] Mishra P.C. Nayak S.K. and Mukherjee S. (2013) "Thermal conductivity of nanofluids-an extensive literature review" *International Journal of Engineering Research and Technology*, 2, 9, pp. 734-745.
- [60] Beck M.P. Yuan Y. Warrier P. and Teja A.S. (2009) "The effect of particle size on the thermal conductivity of alumina nanofluids" *Journal of Nanoparticle Research*, 11, 5, pp. 1129-1136.
- [61] Kim S.H. Choi S.R. and Kim D. (2007) "Thermal conductivity of metal-oxide nanofluids: particle size dependence and effect of laser irradiation" *Journal of Heat Transfer*, 129, 3, pp. 298-307.
- [62] Maïga S.E.B. Nguyen C.T. Galanis N, and Roy G. (2004) "Heat transfer behaviours of nanofluids in a uniformly heated tube" *Superlattices and Microstructures*, 35, 3, pp. 543-557.
- [63] Vajjha R.S. Das D.K. and Namburu P.K. (2010) "Numerical study of fluid dynamic and heat transfer performance of Al₂O₃ and CuO nanofluids in the flat tubes of a radiator" *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 31, 4, pp. 613-621.
- [64] SITPRASERT C. (2007) "A thermal conductivity model for nanofluids including effect of the temperature-dependent interfacial layer" PHD Thesis, Kasetsart University KASETSART.
- [65] Pak B.C. and Cho Y.I. (1998) "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles" *Experimental Heat Transfer an International Journal*, 11, 2, pp. 151-170.

- [66] Das S.K. Putra N. Thiesen P. and Roetzel W. (2003) "Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids" *Journal of Heat Transfer*, 125, 4, 567-574.
- [67] Corcione M. (2011) "Empirical correlating equations for predicting the effective thermal conductivity and dynamic viscosity of nanofluids" *Energy Conversion and Management*, 52, 1, pp. 789-793.
- [68] Masuda H. Ebata A. Teramae K. and Hishinuma N. (1993) "Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles" *Netsu Bussei*, 7, 4, pp. 227-233.
- [69] Keblinski P. Phillpot S. Choi S. and Eastman J. (2002) "Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids)" *International journal of heat and mass transfer*, 45, 4, pp. 855-863.
- [70] Eastman J.A. Phillpot S. Choi S. and Keblinski P. (2004) "Thermal transport in nanofluids 1" *Annual Review of Material Research*, 34, pp. 219-246.
- [71] Evans W. Fish J. and Keblinski P. (2006) "Role of brownian motion hydrodynamics on nanofluid thermal conductivity" *Applied Physics Letters*, 88, 9, pp. 93-116.
- [72] Yu W. and Choi S. (2003) "The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated maxwell model" *Journal of Nanoparticle Research*, 5, 1, pp. 167-171.
- [73] Leong K. Yang C. and Murshed S. (2006) "A model for the thermal conductivity of nanofluids--the effect of interfacial layer" *Journal of Nanoparticle Research*, 8, 2, pp. 245-254.
- [74] Shi L. and Majumdar A. (2002) "Thermal transport mechanisms at nanoscale point contacts" *Journal of Heat Transfer*, 124, 2, pp.329-337.
- [75] Lee S. Choi S.S. Li S. and Eastman J. (1999) "Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles" *Journal of Heat Transfer*, 121, 2, pp. 280-289.
- [76] Eastman J. Choi S. Li S. Yu W. and Thompson L. (2001) "Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles" *Applied Physics Letters*, 78, 6, pp. 718-720.

- [77] Xie H. Wang J. Xi T. Liu Y. Ai F. and Wu Q. (2002) "Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles" *Journal of Applied Physics*, 91,7, pp. 4568-72.
- [78] Wasp F.J. (1997) "Solid/liquid slurry pipeline transportation" Trans Tech, Berlin.
- [79] Khanafer K. Vafai K. and Lightstone M. (2003) "Buoyancy-driven heat transfer enhancement in a two-dimensional enclosure utilizing nanofluids" *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 4, 19, pp. 3639-3653.
- [80] Koo J. and Kleinstreuer C. (2004) "A new thermal conductivity model for nanofluids" *Journal of Nanoparticle Research*, 6, 6, pp. 577-588.
- [81] Rusconi R. Williams W.C. Buongiorno J. Piazza R. and Hu L.W. (2007) "Numerical analysis of convective instabilities in a transient short-hot-wire setup for measurement of liquid thermal conductivit" *International Journal of Thermophysics*, 28, 4, pp. 1131-1146.
- [82] Williams W. Buongiorno J. and Hu L.W. (2008) "Experimental investigation of turbulent convective heat transfer and pressure loss of alumina/water and zirconia/water nanoparticle colloids (nanofluids) in horizontal tubes" *Journal of Heat Transfer*, 130, 4, pp. 1-7.
- [83] Rea U. McKrell T. Hu L.w. and Buongiorno J. (2009) "Laminar convective heat transfer and viscous pressure loss of alumina-water and zirconia-water nanofluids" *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 7, pp. 2042-2048.
- [84] Ramires M.L. de Castro C.A.N. Nagasaka Y. Nagashima A. Assael MJ. and Wakeham W.A. (1995) "Standard reference data for the thermal conductivity of water" *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 1995, 24, 3, pp. 1377-1381.
- [85] Pritchard P.J. (2011) "introduction to fluid mechanics" Eighth Edition, John Wiley & Sons, pp. 800.
- [86] Touloukian YS, Saxena S, Hestermans P. (1975) "Thermophysical properties of matter: viscosity" Volume 11, IFI/Plenum, DTIC Document.
- [87] Zakaria I. Azmi W. Mohamed W. Mamat R. and Najafi G. (2015) Experimental investigation of thermal conductivity and electrical conductivity of Al₂O₃ nanofluid in water-ethylene glycol mixture for proton exchange membrane fuel

cell application" International Communications In Heat And Mass Transfer, 61, 61-68.

- [88] Bahiraei M. (2014) "A comprehensive review on different numerical approaches for simulation in nanofluids: traditional and novel techniques" *Journal of Dispersion Science and Technology*, 35, 7, pp. 984-996.
- [89] Özerinç S. Yazıcıoğlu A. and Kakaç S. (2012) "Numerical analysis of laminar forced convection with temperature-dependent thermal conductivity of nanofluids and thermal dispersion" *International Journal of Thermal Sciences*, 62, pp. 138-148.
- [90] Bianco V. Chiacchio F. Manca O. and Nardini S. (2009) "Numerical investigation of nanofluids forced convection in circular tubes" *Applied Thermal Engineering*, 29, 17, pp. 3632-3642.
- [91] Buongiorno J. (2006) "Convective transport in nanofluids" *Journal of Heat Transfer*, 128, 3, pp. 240-250.
- [92] He Y. Men Y. Zhao Y. Lu H. and Ding Y. (2009) "Numerical investigation into the convective heat transfer of TiO₂ nanofluids flowing through a straight tube under the laminar flow conditions" *Applied Thermal Engineering*, 29, 10, pp.1965-1972.
- [93] Utomo A.T. Haghighi E.B. Zavareh A.I. Ghanbarpourgeravi M. Poth H. Khodabandeh R. Palm B. and Pacek A. (2014) "The effect of nanoparticles on laminar heat transfer in a horizontal tube" *International Journal of Heat and Mass Transfer*,69, pp. 77-91.
- [94] Liao L. and Liu Z.H. (2009) "Forced convective flow drag and heat transfer characteristics of carbon nanotube suspensions in a horizontal small tube" *Heat and mass transfer*, 45, 8, pp. 1129-1136.
- [95] Liu D. Yu L. (2010) "Experimental investigation of single-phase convective heat transfer of nanofluids in a minichannel" 14th International Heat Transfer Conference, pp. 641-652, American Society of Mechanical Engineers.
- [96] Escher W. Brunschwiler T. Shalkevich N. Shalkevich A. Burgi T. Michel B. and Poulikakos D. (2011) "On the cooling of electronics with nanofluids. *Journal of heat transfer*" 133, 5, pp. 1-11.

- [97] Hwang K.S. Jang S.P. and Choi S.U. (2009) "Flow and convective heat transfer characteristics of water-based Al₂O₃ nanofluids in fully developed laminar flow regime" *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 1, pp. 193-199.
- [98] Xuan Y. and Li Q. (2003) "Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids" *Journal of Heat transfer*, 125, 1, pp. 151-155.
- [99] Wen D. and Ding Y. (2004) "Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions" *International journal of heat and mass transfer*, 47, 24, pp. 5181-5188.
- [100] Yang Y. Zhang Z.G. Grulke E.A. Anderson W.B. and Wu G. (2005) "Heat transfer properties of nanoparticle-in-fluid dispersions (nanofluids) in laminar flow" *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 48, 6, pp. 1107-1116.
- [101] Mirmasoumi S. and Behzadmehr A. (2008) "Effect of nanoparticles mean diameter on mixed convection heat transfer of a nanofluid in a horizontal tube" *International journal of heat and fluid flow*, 29, 2, pp. 557-566.

- [103] Ryzhkov I. and Minakov A.V. (2014) "The effect of nanoparticle diffusion and thermophoresis on convective heat transfer of nanofluid in a circular tube" *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 77, pp. 956-69.
- [104] Ho c.j. and lin Y.J. (2014) "Turbulent forced convection effectiveness of aluminawater nanofluid in a circular tube with elevated inlet fluid temperatures: an experimental study" *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 57, pp. 247-253.
- [105] Ravikanth S.V. and Dustin K.D. (2014) "Development of new correlations for the nusselt number and the friction factor under turbulent flow of nanofluids in flat tubes" *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 80, pp. 353-67.
- [106] He Y. Men Y. Zhao Y. Lu H. and Ding Y. (2009) "Numerical investigation into the convective heat transfer of TiO₂ nanofluids flowing through a straight tube under the laminar flow conditions" *Applied Thermal Engineering*, 29, 10, pp. 1965-72.
- [107] White F.M. (1991) "Viscous fluid flow" McGraw-Hill, pp. 197.

[108] Frano B. (2005) "*PEM fuel cells: theory and practice*" Elsevier Academic Press, Burlington, MA, pp. 456.

Abstract

One of the most important issues in the field of "Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells (PEMFC)" is the heat management in the cell. In fact, heat management deals with keeping the operating temperature at the proper range in the cell and trying to uniform temperature distribution in the cell surface. Temperature distribution, has a great impact on the effectiveness, efficiency and durability of the fuel cell. Usually for cooling the polymer membrane fuel cells, water is flowed in the channels embedded in the cooling plates. To date, very few studies have been carried out to improve the cell cooling system and almost no research has been done on the cell cooling system using nanofluids.

In this research, polymer membrane fuel cell cooling using nanofluid is numerically studied. Among the various nanofluid simulation methods, single phase homogeneous technique has been selected and thermophysical properties of the nanofluid as a function of temperature and nanoparticle concentration have been considered. Accuracy and precision of the selected technique for the simulation, is evaluated through numerical analysis of laminar flow heat transfer of nanofluid flow in the tube. The results show that the selected technique is accurate. In this thesis, fuel cell cooling and laminar flow heat transfer of nanofluid is investigated in four cooling plates with four different cooling fluid. The first fluid is water and the rest of three are nanofluids with different nanoparticle concentrations. The flow of each fluid is considered under three different Reynolds numbers. The performance of different cooling fluids as well as different cooling plates is studied and the results are compared in terms of different quantities such as "maximum surface temperature difference", "uniformity of surface temperature distribution" and "pressure drop". Then the impact of different parameters such as Reynolds number, geometry and concentration of the nanoparticles, on these quantities is investigated. The results show that, among the different cooling plates, the "Multi-Pass Serpentine Flow Field" has the best performance. It is also proved that the use of nanofluid, in general, will benefit the cooling and significantly improve those parameters directly impact the fuel cell performance and efficiency. By increasing the nanoparticles concentration by 0.006, the temperature uniformity index will decrease about 13 percent, the minimum and maximum temperature difference at the cooling plate surface will decrease about 13 percent and the pressure drop will increase about 35 percent.



Faculty of Mechanical Engineering

A numerical study on cooling of PEM fuel cell with nanofluid coolant

Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Science (M.Sc)

Mostafa Kordi

Supervisors:

Dr. A. Jabbari Moghaddam Dr. M. Farzaneh Gord Dr. E. afshari

Date: SEPTEMBER 2015