

تأثیر طراحی مبدل حرارتی مدارچاپی هیبریدی بر عملکرد نیروگاه انرژی خورشیدی متمرکز: تحلیل ترموهیدرولیکی

محمدعلی صالحی^۱، المیرا جلیوند^{۲*}

۱- دانشیار دانشگاه گیلان، salehi.guilan.che@gmail.com

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه گیلان، elmirajalilvand@yahoo.com

خلاصه

این پژوهش عملکرد ترموهیدرولیکی مبدل حرارتی مدارچاپی هیبریدی مجهز به محرک‌های توربولانسی حفره‌ای را در نیروگاه انرژی خورشیدی متمرکز نسل سوم بررسی می‌کند. با استفاده از نمک مذاب کلرایدی ($MgCl_2/NaCl/KCl$) و دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی به عنوان سیال‌های انتقال حرارت، یک مدل عددی سه-بعدی توسعه داده شد تا سه نوع جدیدی از محرک‌های توربولانسی حفره‌ای (کروی، مخروطی ناقص و مثلثی روبه‌بالا) تحلیل شوند. نتایج نشان داد که حفره مخروطی ناقص با ایجاد گردابه‌های قوی‌تر، بهبود در انتقال حرارت و کاهش افت فشار، بهترین عملکرد ترموهیدرولیکی را ارائه می‌دهد. این برتری، ناشی از توزیع بهینه جریان، پخش گردابه‌های قوی‌تر، جدایش و اتصال مجدد جریان داخل حفره می‌باشد. یافته‌های این تحقیق راهکاری عملی برای افزایش راندمان نیروگاه‌های خورشیدی متمرکز در دماهای بالای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد از طریق بهینه‌سازی هندسی کانال‌های مبدل حرارتی با محرک‌های توربولانسی ارائه می‌کند، که می‌تواند چالش‌های سیستم‌های ذخیره‌سازی حرارتی و بلوک قدرت را در این نیروگاه‌ها برطرف سازد.

کلمات کلیدی: مبدل حرارتی مدارچاپی، انرژی خورشیدی، دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی، نمک مذاب کلرایدی $MgCl_2/NaCl/KCl$ ، محرک‌های توربولانسی حفره‌ای، عملکرد ترموهیدرولیکی

۱. مقدمه

در دهه‌های اخیر، رشد فزاینده مصرف انرژی و نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از استفاده بی‌رویه از منابع فسیلی، توجه جهانی را به سمت بهره‌برداری از منابع تجدیدپذیر سوق داده است. بر اساس گزارش اداره اطلاعات انرژی آمریکا در چشم انداز بین المللی انرژی ۲۰۲۳ [۱]، تولید برق جهان تا سال ۲۰۵۰ بین ۳۰٪ تا ۷۶٪ نسبت به سال ۲۰۲۲ رشد خواهد کرد. همچنین، فناوریهای کربن-صفر (مانند انرژی‌های خورشیدی و بادی) حدود ۵۴٪ تا ۶۷٪ از برق جهانی را تأمین می‌کنند که نشان‌دهنده سهم قابل توجه انرژیهای تجدیدپذیر (به‌ویژه انرژی خورشیدی) در آینده انرژی جهان است. در این میان، فناوری نیروگاه‌های "انرژی خورشیدی متمرکز"، همراه با سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، به عنوان یکی از کارآمدترین و پایدارترین گزینه‌ها برای تولید برق پاک در مقیاس صنعتی مطرح شده‌اند [۲]. این فناوری، با فراهم



کردن امکان ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، می‌تواند پاسخگوی نیاز به تولید برق پیوسته حتی در ساعات غیرآفتابی باشد، که این ویژگی آن را از بسیاری از دیگر فناوری‌های تجدیدپذیر متمایز می‌سازد.

نیروگاه‌های انرژی خورشیدی متمرکز شامل سه بخش اصلی می‌باشند: **میدان خورشیدی، سیستم ذخیره‌سازی انرژی حرارتی، و بلوک قدرت**. هر یک از این اجزا نقش مهمی در تولید انرژی خورشیدی به صورت برق پایدار و قابل اطمینان ایفا می‌کنند. معماری میدان خورشیدی در نیروگاه‌های انرژی خورشیدی متمرکز از نقطه نظر مکانیزم تمرکز تابش پرتوهای خورشیدی به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: (۱) متمرکز کننده‌های نقطه‌ای (مانند سیستم برج دریافت کننده مرکزی و سیستم کلکتور آنتن سهمی‌گون)، و (۲) متمرکز کننده‌های خطی (سیستم کلکتور سهموی خطی و سیستم بازتابنده فرّنل خطی) [۳]. مطابق با آخرین گزارش منتشر شده در سال ۲۰۲۳، سیستم کلکتور سهموی خطی به عنوان پرکاربردترین فناوری مورد استفاده در نیروگاه‌های انرژی خورشیدی متمرکز (به میزان ۷۳٪)، پس از آن سیستم برج دریافت کننده مرکزی (به میزان ۲۳٪) و سیستم بازتابنده فرّنل خطی (به میزان ۴٪) گزارش شده است و در حال حاضر هیچ نیروگاه‌های انرژی خورشیدی متمرکز با فناوری کلکتور آنتن سهمی‌گوی در حال فعالیت وجود ندارد [۱].

نیروگاه‌های انرژی خورشیدی متمرکز با سیستم برج دریافت کننده مرکزی، مقادیر زیادی گرما را مدیریت می‌کنند که در طول ساعات تابش خورشید تولید می‌شود، و مستعد ذخیره‌سازی راحت برای تولید برق در طول شب می‌باشد. هدف نیروگاه‌های انرژی خورشیدی متمرکز این است که به یک فعالیت بدون وقفه در تمام طول سال دست پیدا کنند، از اینرو در اکثر نیروگاه‌های انرژی خورشیدی متمرکز، دو مخزن ذخیره‌سازی انرژی حرارتی برای تولید برق در ساعات شب در دسترس می‌باشد: مخزن داغ (با دمای تقریبی بین ۴۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد)، که در آن گرمای جذب شده توسط میدان خورشیدی برای استفاده در طول شب ذخیره می‌شود؛ و مخزن سرد (با دمای تقریبی ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد)، جایی که سیال انتقال حرارت که قبل از بازگشت به میدان خورشیدی، در آن انباشته می‌شود. مطابق با آخرین تحقیقات صورت گرفته در سال ۲۰۲۳، اغلب پروژه‌های جدیدی که مرتبط با نیروگاه‌های انرژی خورشیدی متمرکز مبتنی بر تکنولوژی برج دریافت کننده انرژی خورشیدی می‌باشند، شامل ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی حرارتی بالغ بر ۱۷.۵ ساعت در قالب سیستم‌های دو مخزن سرد و گرم نمک مذاب می‌باشند [۴].

سیال انتقال حرارت یکی از مهمترین مولفه‌ها برای تعیین عملکرد و کارایی کلی سیستم‌های نیروگاهی انرژی خورشیدی متمرکز می‌باشد. ویژگی‌های مورد نظر یک سیال انتقال حرارت عبارتند از: نقطه ذوب پایین، نقطه جوش و پایداری حرارتی بالا، فشار بخار کم در دمای بالا، ویسکوزیته کم، هدایت حرارتی بالا، ظرفیت حرارتی بالا برای ذخیره‌سازی انرژی و هزینه کم [۵].

مطابق با مطالعات صورت گرفته، امروزه در پیشرفته‌ترین نیروگاه‌های انرژی خورشیدی متمرکز (نسل سوم) با سیستم برج دریافت کننده مرکزی، ماده ذخیره‌سازی حرارتی نمک مذاب به عنوان یک سیال انتقال حرارت در سیستم ذخیره‌سازی انرژی حرارتی فعال مستقیم به کار گرفته می‌شود. نمک‌های مذاب به دلیل دمای کاری بالا (بیش از ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد) و ظرفیت گرمایی بالا، فشار بخار و خاصیت خوردندگی پایین، و خواص حرارتی و فیزیکی خوب در دماهای بالا، گسترده‌ترین سیال انتقال حرارت مورد مطالعه و کاربرد در سیستم‌های نیروگاهی انرژی خورشیدی متمرکز نسل جدید می‌باشند [۶]. نمک‌های مذاب نیتراتی (مانند نمک خورشیدی) به طور گسترده به عنوان ماده ذخیره‌سازی حرارتی در نیروگاه‌های انرژی خورشیدی متمرکز استفاده می‌شوند. این نمک‌ها از ترکیبات نیترات‌های مختلف مانند سدیم نیترات (NaNO_3)، پتاسیم نیترات (KNO_3) و لیتیم نیترات (LiNO_3) و تشکیل شده‌اند و با دارا بودن ویژگی‌هایی مانند دمای ذوب پایین، ظرفیت گرمایی بالا و قیمت پایین از خصوصیات منحصر به فرد این گونه از نمک‌های مذاب به شمار می‌آید. نمک‌های نیترات مذاب می‌تواند تا دمای ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد در فاز عملیاتی قرار بگیرند، اما برای محدود کردن فرآیند خوردگی در مخازن گرم و

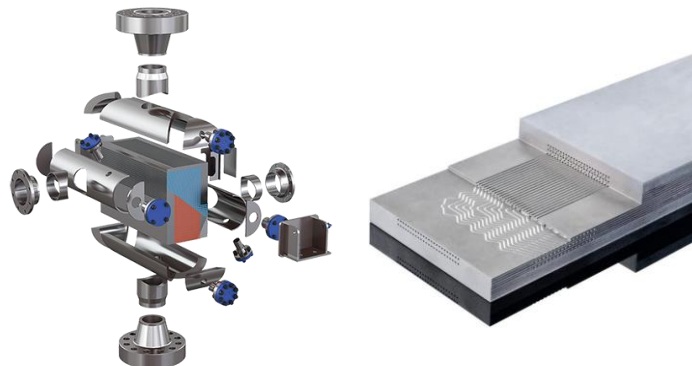
سرد، دمای نمک مذاب تا ۵۶۵ درجه سانتی‌گراد در نیروگاه‌های انرژی خورشیدی متمرکز محدود می‌شود. در دمای بالای ۵۶۵ درجه سانتی‌گراد، واکنش‌های تجزیه و تخریب نمک شروع می‌شود و در نتیجه نمک نیترات مذاب از نظر شیمیایی ناپایدار می‌شود و یون‌های اکسیدی تولید کرده که بسیار خورنده می‌شوند [۷].

تمرکز برنامه‌های تحقیقاتی بر روی نسل سوم نیروگاه انرژی خورشیدی متمرکز و اعمال دمای عملیاتی بالاتر به منظور بهره‌وری بیشتر سیکل توانی در بلوک قدرت و کاهش هزینه‌ها، و از سوی دیگر، دمای کاری محدود تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد اغلب نمک‌های مذاب نیتراتی به دلیل محدودیت در ویژگی پایداری حرارتی این نوع از نمک‌های مذاب، باعث گردید که به‌کارگیری نمک‌های مذاب مخلوط کلرایدی به دلیل ویژگی‌های بارز آن‌ها، از قبیل پایداری حرارتی بالاتر از ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد، فشار بخار اشباع کم، و نیز قیمت پایین‌تر، به طور جدی مطرح گردد [۸]. با استفاده از نمودار فاز بدست آمده از پایگاه داده‌های ترمودینامیکی نرم‌افزار فکتسیج (FactSage)، حداقل دمای ذوب دقیق نمک مذاب مخلوط سه‌تایی کلرایدی متشکل از منیزیم کلرید ($MgCl_2$)، سدیم کلرید ($NaCl$)، پتاسیم کلرید (KCl)، به ترتیب با درصد وزنی ۴۸.۶٪، ۳۰.۹٪ و ۲۰.۵٪، به میزان ۳۸۳ درجه سانتی‌گراد گزارش شده است [۹].

به منظور بهره‌برداری از نیروگاه انرژی خورشیدی متمرکز با راندمانی بالا، تحلیل و بهینه‌سازی عملکرد پایدار بلوک قدرت ضروری می‌باشد. برای دستیابی به راندمان سیکل توانی در محدوده ۵۰٪، به دمای سیال عامل ورودی به توربین به میزان بیشتر از ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد نیاز خواهد بود. در نتیجه، پیشرفت‌های کنونی در معرفی سیالات عامل جدید با کارایی بالا که قادر به مقاومت در برابر فشارهای عملیاتی و دماهای بالاتر هستند، باعث افزایش راندمان بلوک قدرت می‌شود. استفاده از دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی به عنوان یک سیال عامل در سیکل توانی نسل سوم نیروگاه‌های انرژی خورشیدی متمرکز، مزایای متعددی را در مقایسه با بخار آب و یا هلیوم در سیکل‌های توانی مرسوم ارائه می‌دهد. در مقایسه با سیکل رانکین بخار معمولی با دمای ورودی توربین کمتر از ۵۶۵ درجه سانتی‌گراد، بازده تبدیل گرما-به-الکتریسیته هنگام استفاده از "سیکل بسته برایتون دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی" با دمای ورودی به توربین گازی بیش از ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، می‌تواند به طور قابل توجهی بالاتر باشد [۱۰].

سیستم‌های تولید برق و تبدیل گرما-به-توان، راندمان تولید برق شدیداً به مبدل‌های حرارتی که از اجزاء کلیدی در انتقال انرژی حرارتی به شمار می‌آیند، وابسته هستند. انتقال حرارت مؤثر میان سیال انتقال حرارت در واحد سیستم ذخیره‌سازی انرژی حرارتی و سیال عامل در بلوک قدرت با دماهای بالا، نیازمند استفاده از مبدل‌های حرارتی فشرده با فناوری‌های پیشرفته است. در بین انواع مختلف مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای فشرده، "مبدل حرارتی مدارچاپی" به دلیل ویژگی‌های مطلوب تراکم و استحکام ساختاری بالا، راندمان و اثربخشی بالا و عملکرد قابل اعتماد آن تحت شرایط فشار و دمای شدید، کاندیدای مناسبی برای انتقال حرارت بین دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی و سیالاتی نظیر نمک‌های مذاب در نیروگاه‌های انرژی خورشیدی متمرکز است.

مبدل حرارتی مدارچاپی از مجموعه‌ای صفحات نازک با شیارهای مینیاتوری با ابعاد میلیمتری (یا زیر میلیمتری) در هر صفحه، تشکیل شده است. همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود [۱۱]، مبدل حرارتی مدارچاپی یک مبدل حرارتی فشرده از نوع صفحه‌ای، با یکپارچگی بالا می‌باشد که در آن، مسیر کانال‌های جریان سیال توسط روش اچ الکتروشیمیایی بر روی صفحات فلزی مسطح، ماشین‌کاری فتوشیمیایی می‌شود. سپس، صفحات اچ شده روی هم چیده می‌شوند و توسط فرآیند اتصال نفوذی (جوشکاری نفوذی) به هم متصل شده و بلوک هسته مبدل حرارتی به وجود می‌آید. این کانال‌های کوچک تنگ‌چین (با آرایش نزدیک به هم)، با قطری در حدود ۰.۱ الی ۲ میلی‌متر، منجر به مبدل حرارتی فشرده‌ای با چگالی مساحت سطح بالا و بنابراین حجم کمتری از مواد جامد برای همان نرخ انتقال حرارت می‌شود که آنها را برای کاربردهای فشار بالا و دمای بالا مناسب می‌کند.

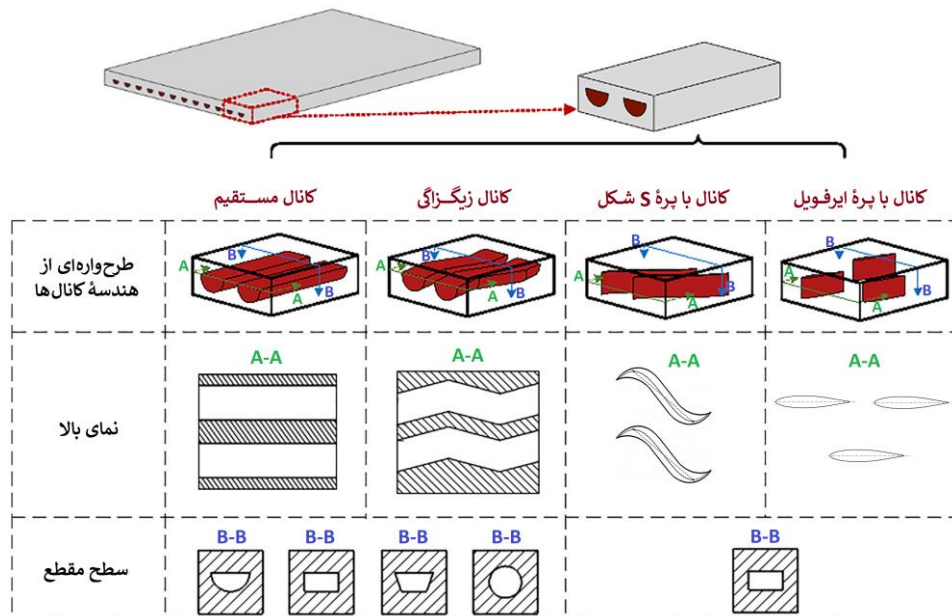


شکل ۱ - ساختار و هسته یک مبدل حرارتی مدارچاپی [۱۱]

مبدل‌های حرارتی مدارچاپی به دلیل ضریب فشردگی سطح بالا (بزرگتر از ۲۵۰۰ مترمربع بر مترمکعب) جزء "مبدل‌های حرارتی فوق فشرده" به حساب می‌آیند. بر این اساس، به دلیل میزان فشردگی سطح بالایی که طراحی مبدل حرارتی مدارچاپی به وجود آورده است، حجم مبدل‌های حرارتی مدارچاپی معمولاً ۸۵٪ برابر کوچک‌تر و ۷ برابر سبک‌تر از مبدل‌های حرارتی معمولی پوسته-لوله برای همان میزان بازده حرارتی و افت فشار طراحی شده، می‌باشد. از نظر عملکرد، مبدل‌های حرارتی مدارچاپی به‌ویژه برای سیستم‌هایی که در دمای بالاتر از ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشارهای بالای ۲۰ مگاپاسکال کار می‌کنند، نظیر نیروگاه‌های انرژی خورشیدی متمرکز نسل سوم با سیکل برایتون دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی، گزینه‌ای بسیار کارآمد محسوب می‌شوند. در طراحی این مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای فشرده، انتخاب جنس صفحات بسیار حائز اهمیت است. مواد پیشنهادی شامل فولادهای زنگ‌نزن، سوپرآلیاژهای پایه نیکل، و اخیراً کامپوزیت‌های زمینه فلزی W-ZrC (تنگستن - زیرکونیوم کاربرد) هستند، که توانایی تحمل شرایط دمایی و فشاری بالا را دارا می‌باشند [۱۲].

ساختار و پارامترهای هندسی مبدل‌های حرارتی مدارچاپی، به عنوان عوامل کلیدی جهت تعیین ویژگی‌های انتقال حرارت و افت فشار به حساب می‌آیند. همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، هندسه کانال‌ها، به عنوان پارامتر اصلی در ساختار هسته مبدل‌های حرارتی مدارچاپی، شامل دو نوع اصلی کانال جریان پیوسته (شامل کانال مستقیم و کانال زیگزاگ) و کانال جریان ناپیوسته می‌باشد [۱۳]. کیم و همکاران [۱۴]، عملکرد حرارتی و هیدرولیکی را برای مبدل‌های حرارتی مدارچاپی با کانال‌های مستقیم را مورد بررسی قرار دادند. پارامترهای ساختاری کانال‌های زیگزاگ، شامل زاویه و طول گام زیگزاگ، تعیین‌کننده الگوی مسیر جریان سیال در داخل کانال بوده و برای بهینه‌سازی عملکردی ترموهیدرولیکی کانال‌های زیگزاگ حیاتی می‌باشد [۱۵].

کانال‌های جریان ناپیوسته شامل کانال با پره S شکل و یا کانال با پره ایرفویل است. پارامترهای ساختاری کانال با پره S شکل شامل طول و عرض پره، عرض کانال و زاویه پره می‌باشد [۱۶]. چو و همکاران [۱۷]، و ژانگ و همکاران [۱۸] پارامترهای هندسی پره‌های ایرفویل را بر روی عملکرد ترموهیدرولیکی مبدل حرارتی مدارچاپی مورد بررسی قرار دادند. مطالعات نشان می‌دهد که مبدل حرارتی مدارچاپی ایرفویل‌دار انتقال حرارت بالا و افت فشار کمتری در بین دو کانال با پره S شکل و کانال با پره ایرفویل را نشان می‌دهند.



شکل ۲- طرح واره‌ای از هندسه کانال‌های داغ و سرد در هسته مبدل حرارتی مدارچاپی [۱۳]

پژوهشگران متعددی مانند پارک و لیگرانی [۱۹]، و همچنین لطفی و ساندن [۲۰] بر روی بهبود عملکرد ترموهیدرولیکی مبدل‌های حرارتی فشرده با استفاده روش‌های غیرفعال افزایش انتقال حرارت مانند استفاده از محرک‌های توربولانسی سطحی مانند حفره‌ها، مطالعات گسترده‌ای انجام داده‌اند. نتایج این تحقیقات نشان داد که به کارگیری ساختارهای حفره‌ای می‌تواند موجب ایجاد گردابه‌های پیچیده، افزایش اختلاط جریان، و در نتیجه بهبود قابل توجه نرخ انتقال حرارت شود، بدون آنکه منجر به افت فشار زیاد شود.

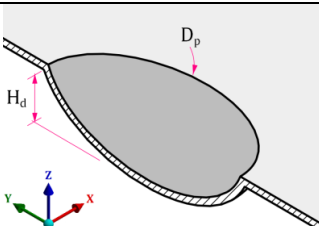
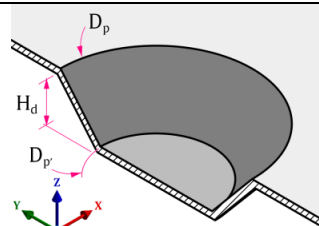
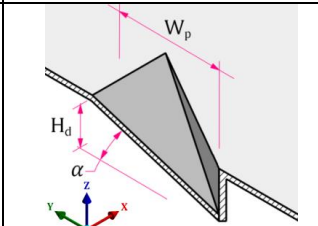
در پژوهش پیش‌رو با بهره‌گیری از این دستاوردها، طراحی و تحلیل ترموهیدرولیکی یک مبدل حرارتی مدارچاپی هیبریدی، با محرک‌های توربولانسی حفره‌ای در کانال سیال نمک مذاب کلرایدی، با استفاده از روش عددی شبیه‌سازی دینامیک سیالات محاسباتی انجام گرفته است. نتایج این مطالعه می‌تواند به توسعه نسل جدیدی از مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای فشرده با راندمان بالا در سامانه‌های نسل سوم نیروگاه‌های انرژی خورشیدی متمرکز کمک شایانی نماید.

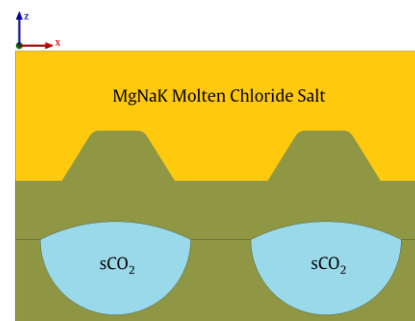
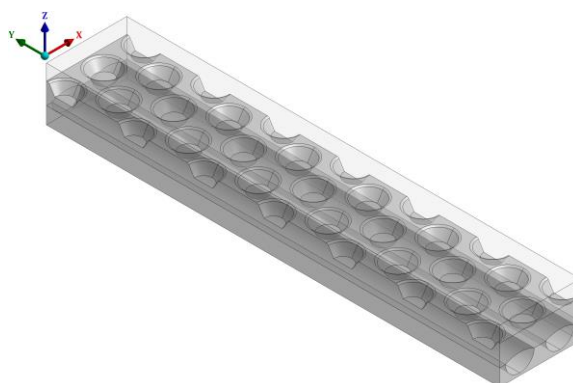
۲. مشخصات هندسی کانال‌ها و مشخصات ترمودینامیکی مواد

در تحقیق پیش‌رو، یک طراحی مفهومی با عنوان مبدل حرارتی مدارچاپی هیبریدی ارائه شده است که از دو نوع کانال جریان سیال شامل کانالی با سطح مقطع نیم‌دایره‌ای-نیم‌بیضی که سیال سرد (دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی) در آن جریان دارد و کانالی حفره‌دار با سطح مقطع عرضی مستطیلی که سیال داغ (نمک مذاب) در آن جاری می‌باشد. جزئیات پارامترهای هندسی محرک‌های توربولانسی حفره‌ای به کار رفته در مبدل حرارتی مدارچاپی هیبریدی در جدول ۱ آورده شده است. در شکل ۳، نمایی سه‌بعدی واحد از هسته مرکزی مبدل حرارتی مدارچاپی هیبریدی با حفره مخروطی ناقص با پیکربندی متناوب نشان داده شده است. کانال‌های مسیر جریان سیال دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی با گامی برابر با ۰.۱۴ میلی‌متر قرار دارند و از دو صفحه کامپوزیت فلزی W-ZrC چیده تشکیل شده‌اند. صفحه پایینی با ضخامت ۱.۴۵ میلی‌متر دارای شیار نیم‌دایره‌ای به شعاع ۱.۲۵ میلی‌متر و صفحه بالایی با ضخامت ۱.۸۵ میلی‌متر دارای شیار نیم‌بیضی به شعاع ۲.۷ میلی‌متر می‌باشد. برای بدست آوردن خواص ترمودینامیکی و انتقالی سیال دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی، از پایگاه داده نرم‌افزار رفیرآپ استفاده

شد. خواص ترمودینامیکی نمک مذاب مخلوط سه‌تایی کلرایدی MgNaK در بازه دمایی ۶۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد به‌طور کامل از مرجع [۹] استخراج شده و همچنین مشخصات فیزیکی کامپوزیت زمینه فلزی جدید W-ZrC در بازه دمایی ۴۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد از مرجع [۱۲] حاصل شده است.

جدول ۱- ویژگی‌های هندسی محرک‌های توربولانسی حفره‌ای

حفره کروی	حفره مخروطی ناقص	حفره مثلثی رو به بالا
		
$H_d/D_p = 0.25$	$H_d/D_p = 0.25, D_{p'}/D_p = 0.6$	$H_d/W_p = 0.25, \alpha = 17.5^\circ$



شکل ۳- طرح‌واره سه-بعدی و نمایی از سطح مقطع ناحیه محاسباتی

۳. شرایط مرزی و کنترل حل‌کننده

ترکیبی از شرط مرزی ورودی (برای تعریف مشخصات جریان ورودی بر اساس دبی جرمی) و شرط مرزی خروجی (بر اساس فشار استاتیک)، اعمال شده است. شرط مرزی تقارن، شرط مرزی دوره‌ای، و همچنین در مرزهای مشترک بین ناحیه جامد و سیال، از شرط مرزی جفت‌شدگی دما و جریان حرارتی استفاده شده است تا تبادل حرارت بین سیال و دیواره‌ها به درستی مدل‌سازی شود. معادلات حاکم از قبیل معادله پیوستگی، معادلات ناویر-استوکس و معادله انرژی، بر ساختار و شرایط مرزی مبدل حرارتی مدارچاپی هیبریدی با استفاده از ماژول نرم‌افزاری دینامیک سیالات محاسباتی ANSYS CFX حل شده‌اند. الگوریتم عددی بر پایه روش گسسته‌سازی حجم محدود است و معادلات حاکم توسط روش حجم محدود مبتنی بر المان و با استفاده از الگوریتم با دقت بالا برای معادلات جابه‌جایی، و معادلات آشفتگی با استفاده از مدل آشفتگی انتقال تنش برشی $SST k-\omega$ حل می‌شوند. علاوه بر این، از جفت‌شدگی فشار-سرعت با استفاده از الگوریتم شبیه به سیمپل، برای اطمینان از صحت حل استفاده شده است [۲۱]. در طول فرآیند حل، از روش مقادیر باقی‌مانده ماکزیمم برای تمامی معادلات گسسته‌شده، کمتر از 10^{-8} حفظ می‌شود که این مقدار به‌عنوان معیار همگرایی در نظر گرفته شده است.

۴. شبکه بندی و استقلال از شبکه

از توپولوژی شبکه هیبریدی با استفاده از نرم‌افزار تجاری ANSYS ICEM CFD برای گسسته‌سازی کلیه دامنه‌های محاسباتی سه‌بعدی به کار گرفته شد. همچنین، به منظور بهبود صحت نتایج شبیه‌سازی عددی، شبکه اطراف حفره‌ها و نزدیک به دیواره‌ها، به‌طور ویژه‌ای متراکم شده است تا جریان‌های ثانویه به‌طور دقیق‌تری حل شوند. آزمایشات استقلال از شبکه به‌طور دقیق از طریق پالایش مجدد و مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی انجام گردید. به منظور تأیید استقلال نتایج نسبت به شبکه، چهار تعداد مختلف شبکه‌بندی شامل حدود ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ میلیون سلول انتخاب ارزیابی شد. با افزایش تعداد نقاط سلولی در شبکه، انحرافات نسبی حداکثری دمای خروجی سیال‌ها بین مجموعه‌های مجاور شبکه به‌طور تدریجی کاهش یافت. انحرافات نسبی دمای خروجی سیال سرد (دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی) و دمای خروجی سیال داغ (نمک مذاب) به‌ترتیب برابر با ۰.۱۴٪ و ۰.۲۵٪ بین مجموعه‌های شبکه با حدود ۱۲ و ۱۳ میلیون سلول هستند. بنابراین، برای حفظ تعادلی بین دقت پیش‌بینی و صرفه‌جویی محاسباتی، تعداد سومین مجموعه از نقاط شبکه در حدود ۱۲ میلیون انتخاب گردید. همچنین، به‌منظور اطمینان از دقت محاسباتی، تمامی شبکه‌ها درون کانال‌ها در نزدیکی دیواره‌ها و حفره‌ها به‌صورت بسیار متراکم تولید شده‌اند، به‌طوری که شرط $y^+ \leq 1$ را برای تمامی دبی‌های جرمی سیال‌ها مورد بررسی، برآورده می‌کنند.

۵. اعتبار سنجی مدل عددی

در تحقیقات تجربی و عددی کانال‌های مجهز به محرک‌های توربولانسی حفره‌ای، پژوهشگرانی مانند تانگ و همکاران [۲۲] و لطفی و ساندن [۲۰] نشان دادند که مدل آشفتگی (توربولانس) نسبت به مدل لایه‌ای (لمینار) برای پیش‌بینی انتقال حرارت و جریان سیال در بازه وسیعی از عدد رینولدز برای کانال‌های بهبودیافته مناسب‌تر است. همچنین گزارش دادند که مدل آشفتگی انتقال تنش برشی $SST k-\omega$ نسبت به سایر مدل‌های ویسکوزیته‌ای مناسب‌تر است، به‌ویژه در مواردی که ویژگی‌های جریان شامل انحنای خطوط گردابه‌های مشابه گردباد باشد. در نتیجه، در کانال‌های انتقال حرارت مجهز به محرک‌های توربولانسی حفره‌ای، انتقال به رژیم آشفتگی در اعداد رینولدز پایین‌تری نسبت به کانال‌های انتقال حرارت صاف رخ می‌دهد. با توجه به بررسی کلیه تحقیقات صورت گرفته، هیچ‌گونه نتایج تجربی مستقیم و تحقیقات آزمایشگاهی مرتبط در مورد ویژگی‌های جریان سیال و انتقال حرارت در مبدل حرارتی مدارچاپی هیبریدی مجهز با محرک‌های توربولانسی حفره‌ای وجود ندارد. با این حال، از یک کار تجربی توسط ایشیزوکا [۲۳]، برای اعتبارسنجی مدل عددی در حالت پایه و از نوع کانال زیگزاگی در این تحقیق استفاده شده است. مقایسه داده‌های تجربی و نتایج شبیه‌سازی عددی نشان می‌دهد که بیشترین خطا برای سمت سیال سرد کمتر از ۳٪، و بیشترین خطا برای سمت سیال داغ کمتر از ۱٪ است که این مقادیر با الزامات دقت مطابقت دارند.

۶. نتایج حل عددی جریان سیال و انتقال حرارت

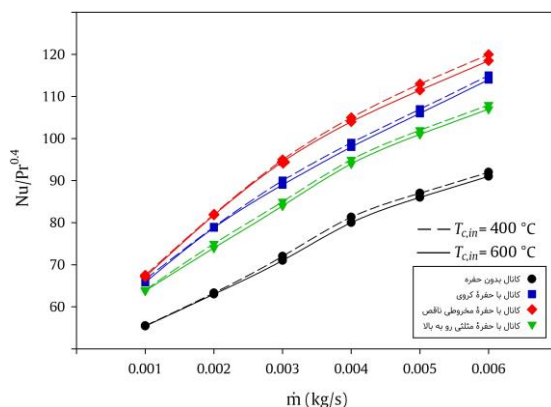
به منظور ارزیابی عملکرد حرارتی محرک‌های توربولانسی حفره‌ای در شرایطی با کمترین دمای سیال سرد (دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی) معادل ۴۰۰ درجه سانتی‌گراد و در بالاترین دبی جرمی و دمایی نمک مذاب (۰.۰۶ کیلوگرم بر ثانیه و ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد)، اختلاف دمای کانال سیال داغ (ΔT_h) در حضور این محرک‌ها طبق جدول ۲ نمایش داده شده است. این نتایج نشان‌دهنده عملکرد برتر حفره مخروطی ناقص نسبت به سایر انواع محرک‌های توربولانسی حفره‌ای در مبدل حرارتی مدارچاپی هیبریدی می‌باشد. لازم به ذکر است که ضریب اصطکاک $f = \Delta P \cdot D_h / (0.5 L \cdot \rho \cdot u^2)$

مربوط به کانال نمک مذاب کلرایدی نیز در جدول ۲ نشان داده شده است. مطابق با بررسی‌های صورت گرفته، برای کانال نمک مذاب کلرایدی، ضریب اصطکاک f با افزایش دبی جرمی در یک دمای ورودی مشخص، افزایش می‌یابد؛ کاهش می‌یابد.

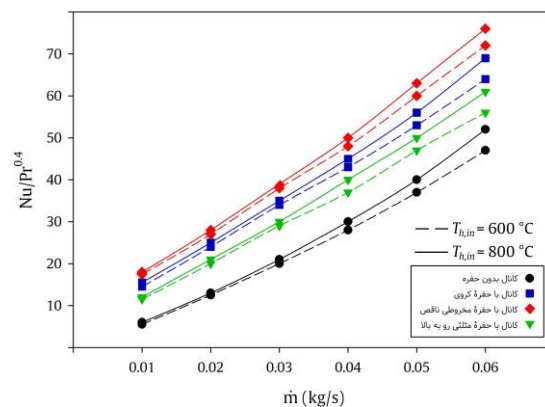
جدول ۲- مقایسهٔ اختلاف دما و اختلاف فشار در کانال سیال داغ تحت بالاترین دما و دبی جرمی ورودی

حفرهٔ مثلی روبه‌بالا	حفرهٔ مخروطی ناقص	حفرهٔ کروی	بدون حفره	پارامترهای اندازه‌گیری شده
36.47	50.81	48.5	31.66	$\Delta T_h [^{\circ}\text{C}]$
0.048	0.028	0.023	0.008	$f [-]$

همانطور که در شکل ۴-الف نشان داده می‌شود، برای کانال نمک مذاب کلرایدی، $Nu/Pr^{0.4}$ با افزایش دبی جرمی در یک دمای ورودی مشخص، افزایش می‌یابد. زیرا دبی جرمی بزرگتر منجر به تلاطم و آشفتگی شدیدتر می‌شود که عملکرد انتقال حرارت را افزایش می‌دهد. در همین حال، همچنین می‌توان مشاهده کرد که $Nu/Pr^{0.4}$ با افزایش دمای ورودی کانال در یک دبی جرمی ثابت، افزایش می‌یابد. این به دلیل دمای بالاتر است که منجر به ویسکوزیته و چگالی دینامیکی کمتر می‌شود.



ب) کانال دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی



الف) کانال نمک مذاب کلرایدی

شکل ۴ - تأثیر دبی جرمی و دما بر ویژگی انتقال حرارت کانال نمک مذاب و کانال دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی

شکل ۴-ب، اثر دبی جرمی و دمای ورودی را بر دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که $Nu/Pr^{0.4}$ با افزایش دبی جرمی، افزایش می‌یابد. علاوه بر این، می‌توان دریافت که هم $Nu/Pr^{0.4}$ با افزایش دمای ورودی در مقدار دبی جرمی ثابت، کاهش می‌یابد. در واقع اثر دمای ورودی بر عملکرد انتقال حرارت کانال دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی کاملاً متفاوت از نمک مذاب است. این موضوع به این دلیل است که تغییر ویسکوزیته دینامیکی دی‌اکسیدکربن فوق‌بحرانی با دما برخلاف نمک مذاب است؛ در واقع دمای ورودی بزرگتر منجر به ویسکوزیته دینامیکی بزرگتری می‌شود. در مقایسه با تحقیقات پیشین که به کارگیری روش‌های مختلف افزایش انتقال حرارت، نظیر استفاده از ایرفول‌ها و ناهمواری‌های سطحی، را مورد بررسی قرار داده‌اند، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از محرک‌های توربولانسی حفره‌ای به‌ویژه حفرهٔ مخروطی ناقص، عملکرد ترموهیدرولیکی بهتری را در مقایسه با سایر روش‌ها به‌دست می‌دهد. ایرفول‌ها قادر به ایجاد جریان‌های ثانویه و افزایش سطوح تماس سیال با دیواره‌ها هستند، اما محرک‌های توربولانسی با ایجاد ساختارهای پیچیده‌تری از گردابه‌ها، به‌طور مؤثرتری انرژی سیال را منتقل کرده و افزایش انتقال حرارت را به‌دنبال دارند و در مقابل، افت فشار کمتری را به مبدل حرارتی

مدارچایی تحمیل می‌کند. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که عملکرد ترموهیدرولیکی سیستم با استفاده از محرک‌های توربولانسی به‌طور قابل توجهی بهبود یابد و در شرایط عملیاتی پیچیده‌تر نیز به‌طور کارآمدتری عمل کند.

۷. مراجع

1. IRENA, "World energy transitions outlook 2023: 1.5°C pathway", International Renewable Energy Agency, <https://www.irena.org/Publications/2023/Jun/World-Energy-Transitions-Outlook-2023>.
2. Lovegrove, K. and Stein, W. (2021), "Concentrating Solar Power Technology: Principles, Developments and Applications", Woodhead Publishing, Cambridge.
3. Hachicha, A.A., Yousef, B.A.A., Said, Z. and Rodríguez, I. (2019), "A Review Study on the Modeling of High-Temperature Solar Thermal Collector Systems", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 112, pp 280–298.
4. Rodat, S. and Thonig, R. (2024), "Status of Concentrated Solar Power Plants Installed Worldwide: Past and Present Data", Clean Technologies, 6, pp 365–378.
5. Vignarooban, K., Xu, X., Arvay, A., Hsu, K. and Kannan, A.M. (2015), "Heat transfer fluids for concentrating solar power systems – A review", Applied Energy, 146, pp 383–396.
6. Peng, Q., Ding, J., Wei, X., Yang, J. and Yang, X. (2010), "The preparation and properties of multicomponent molten salts", Applied Energy, 87 (9), pp 2812–2817.
7. Bradshaw, R. and Meeker, D. (1990), "High-temperature stability of ternary nitrate molten salts for solar thermal energy systems", Solar Energy Materials, 21, pp 51–60.
8. Ding, W. and Bauer, T. (2021), "Progress in Research and Development of Molten Chloride Salt Technology for Next Generation Concentrated Solar Power Plants", Engineering, 7, pp 334–347.
9. Li, Y., Xu, X., Wang, X., Li, P., Hao, Q., Xiao, B. (2017), "Survey and evaluation of equations for thermos-physical properties of binary/ternary eutectic salts from NaCl, KCl, MgCl₂, CaCl₂, ZnCl₂ for heat transfer and thermal storage fluids in CSP", Solar Energy, 152, pp 57–79.
10. Angelino, G. (1968), "Carbon dioxide condensation cycles for power production", Energy Conversion, 8 (2), pp 85–90.
11. Heatric Division of Meggitt (UK) Ltd., <https://www.heatric.com>.
12. Zhu, Q., Tan, X., Barari, B., Caccia, M., Strayer, A.R., Pishahang, M., Sandhage, K.H. and Henry, A. (2021), "Design of a 2MW ZrC/W-based molten-salt-to-sCO₂ PCHE for concentrated solar power", Applied Energy, 300, p 117313.
13. Xie, L., Zhuang, D., Li, Z. and Ding, G. (2022), "Technical characteristics and development trend of printed circuit heat exchanger applied in floating liquefied natural gas", Frontiers in Energy Research, 10, p 885607.

14. Kim, W., Baik, Y.J. and Jeon, S. (2017), "A mathematical correlation for predicting the thermal performance of cross, parallel, and counterflow PCHEs", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 106, pp 1294–1302.
15. Nikitin, K., Kato, Y. and Ngo, L. (2006), "Printed circuit heat exchanger thermal–hydraulic performance in supercritical CO₂ experimental loop", *International Journal of Refrigeration*, 29 (5), pp 807–814.
16. Tsuzuki, N., Kato, Y. and Nikitin, K. (2009), "Advanced microchannel heat exchanger with S-shaped fins", *Journal of Nuclear Science and Technology*, 46 (5), pp 403–412.
17. Chu, W., Li, X. and Ma, T. (2017), "Study on hydraulic and thermal performance of printed circuit heat transfer surface with distributed airfoil fins", *Applied Thermal Engineering*, 114, pp 1309–1318.
18. Zhang, X., Sun, X. and Christensen, R.N. (2016), "Optimization of S-shaped fin channels in a printed circuit heat exchanger for supercritical CO₂ test loop", *Proc. of the 5th International Symposium on Supercritical CO₂ Power Cycles*, pp 28–31.
19. Park, J. and Ligrani, P.M. (2005), "Numerical predictions of heat transfer and fluid flow characteristics for seven different dimpled surfaces in a channel", *Numerical Heat Transfer Part A Applications*, 47 (3), pp 209–232.
20. Lotfi, B. and Sundén, B. (2019), "Thermo-Hydraulic Performance Enhancement of Finned Elliptical Tube Heat Exchangers by Utilizing Innovative Dimple Turbulators", *Heat Transfer Engineering*, 41 (13), pp 1117–1142.
21. Menter, F.R. (1994), "Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications", *AIAA Journal*, 32 (8), pp 1598–1605.
22. Tang, X., Jiang, G. and Cao, G. (2014), "Parameters study and analysis of turbulent flow and heat transfer enhancement in narrow channel with discrete grooved structures", *Process Safety and Environmental Protection*, 93, pp 232–250.
23. Ishizuka, T. (2005), "Thermal-Hydraulic Characteristics of a Printed Circuit Heat Exchanger in a Supercritical CO₂ Loop", *Proc. of the 11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics*, Avignon, France.