



مطالعه مروری برای بهبود عملکرد انتقال حرارت دریافت کننده مرکزی در نیروگاه برج خورشیدی

هادی فرجامهر^۱، نوید بزرگان^{۲*}، علیرضا دنه‌دزفولی^۳

۱. گروه مهندسی مکانیک، موسسه آموزش عالی اروندان خرمشهر، خرمشهر، ایران.
۲. گروه مهندسی مکانیک، واحد آبادان، دانشگاه آزاد اسلامی، آبادان، ایران.
۳. گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران.

*نویسنده مسئول : n.bozorgan@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۱

چکیده

تاکنون تحقیقات متعددی در زمینه بهبود عملکرد دریافت کننده‌های نیروگاه برج خورشیدی صورت گرفته است. بیشتر این مطالعات، در زمینه تغییر چیدمان آینه‌های هلیوستات، انتخاب انواع مختلف سیال به عنوان حامل انرژی گرمایی و تغییر ساختار دریافت کننده می‌باشد، درحالی‌که در زمینه تغییر میدان جریان در لوله‌های دریافت کننده، تحقیقات محدودی صورت گرفته است. در این تحقیق، به بررسی پژوهش‌های انجام شده جهت شناسایی انواع روش‌های موثر برای کاهش گرادیان شار حرارتی متغیر و توزیع دمای غیر یکنواخت با استفاده از المان‌هایی از قبیل بافل‌ها، کوپل‌ها و نوارهای پیچ خورده درون لوله‌های دریافت کننده حفره‌ای برج خورشیدی برای تغییر میدان جریان پرداخته شده است. این المان‌ها با تغییر رژیم جریان از حالت آرام به جریان آشفته باعث اختلاط بهتر جریان، و کاهش ضخامت لایه مرزی شده که افزایش نرخ انتقال حرارت جابجایی درون لوله دریافت کننده خورشیدی را بهبود می‌بخشد.

کلمات کلیدی: نیروگاه برج خورشیدی، دریافت کننده حفره‌ای، لوله‌های دریافت کننده، انتقال حرارت.

مقدمه

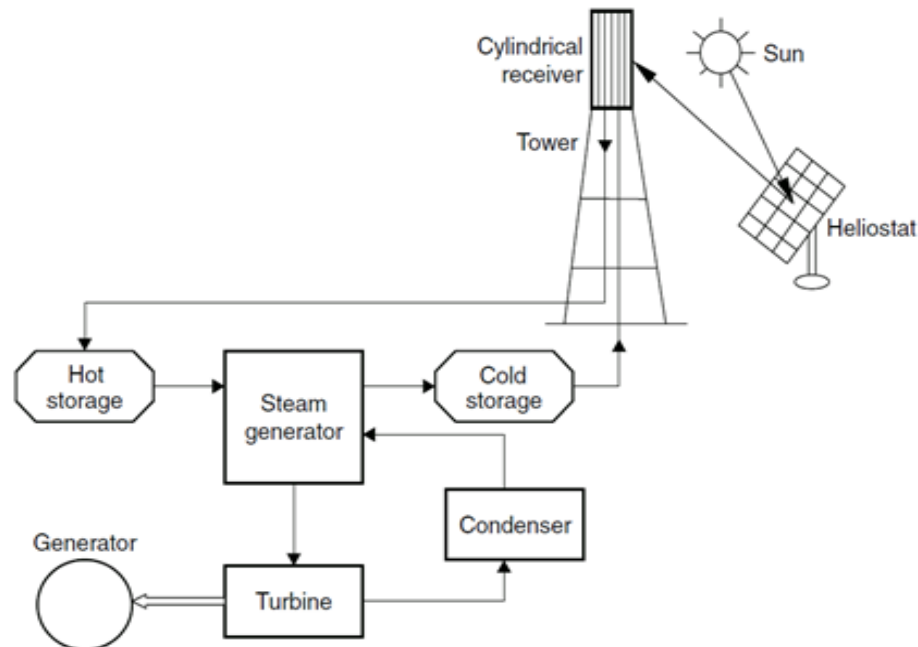
طی پژوهش‌های مختلف مشخص گردیده است که احداث نیروگاه‌های حرارتی خورشیدی در مناطقی توجیه احداث دارند که از تابش خورشیدی بسیار خوبی برخوردار باشند. این مناطق می‌بایست تابش سالانه آنها حداقل ۷۰۰ کیلو وات ساعت بر متر مربع باشد [۱]. به‌طور اساسی تولید انرژی الکتریکی از انرژی خورشید به صورت مستقیم و غیر مستقیم صورت می‌پذیرد. در روش مستقیم تبدیل انرژی الکتریکی توسط یک مکانیزم جامد صورت می‌گیرد که به سیستم فتوولتائیک معروف می‌باشد. در روش غیر مستقیم ابتدا انرژی خورشید به انرژی حرارتی تبدیل شده و سپس از طریق یک سیکل ترمودینامیکی، انرژی حرارتی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌گردد که به آن سیستم حرارتی خورشیدی گفته می‌شود. مهم‌ترین این نیروگاه‌ها شامل: خورشیدی سهموی خطی، دریافت کننده مرکزی، دودکش خورشیدی، بشقابک استرلینگ و استخر خورشیدی می‌باشند. نحوه عملکرد چهار مدل اول بدین صورت است که، ابتدا پرتوهای مستقیم خورشید با استفاده از سطوح انعکاسی روی یک دریافت کننده متمرکز شده و سپس انرژی گرمایی دریافتی توسط یک مبدل حرارتی به یک سیال عامل منتقل می‌گردد و مابقی عملیات تولید انرژی الکتریکی توسط سیستم‌های توربین سنتی صورت می‌پذیرد. در نوع سیستم استخر خورشیدی از انرژی گرمایی دریافت شده جهت سیستم حرارتی و گرمایشی و گرم کردن آب مصرفی منازل و اماکن استفاده می‌گردد.

نیروگاه برج خورشیدی^۱ از یک میدان بزرگ آینه جهت متمرکز کردن پرتوها بر روی یک دریافت کننده مرکزی که در کانون این میدان و در ارتفاع قرار دارد تشکیل شده است. این امر، دریافت شار حرارتی با انرژی گرمایی زیادی توسط دریافت کننده مرکزی

^۱ solar power tower plant



را در پی دارد. این انرژی توسط یک سیال عامل با ظرفیت حرارتی و ضریب انتقال حرارتی بالا، و با گردش در درون لوله‌های دریافت کننده، انرژی حرارتی دریافتی را به سیستم تولید توان منتقل می‌نماید.



شکل ۱: شماتیک نیروگاه حرارتی خورشیدی از نوع دریافت کننده مرکزی [۱]

امروزه، سه دریافت کننده یا گیرنده اصلی برج خورشیدی از جمله دریافت کننده‌های خارجی، حفره‌ای و حجمی [۲ و ۳] وجود دارد. در میان این سه نوع، دریافت کننده حفره‌ای دارای مزایایی همچون بازدهی تبدیل حرارتی خورشیدی بالاتر، اتلاف حرارت بازتابی کم‌تر، اتلاف حرارتی همرفتی کم‌تر، مساحت سطح انتقال حرارت بالاتر و توانایی تحمل شار بالاتر در حفره است [۴]. بنابراین، دریافت کننده حفره‌ای مرکزی خورشیدی به طور گسترده در نیروگاه‌های برج حرارتی خورشیدی استفاده می‌شود [۵ و ۶]. با این حال، با توجه به ویژگی‌های متمرکز آینه‌های هلیوستات، شار خورشیدی در بخش مرکزی سطوح جاذب حرارت دریافت کننده حفره‌ای بسیار بیشتر از لبه و دامنه آن است، بنابراین توزیع دما به طور جدی غیریکنواخت است [۷ و ۸]. گرادیان شار گرمایی بزرگ‌تر و اختلاف دمای پیرامونی لوله‌های دریافت کننده، تنش حرارتی غیریکنواخت و نقاط داغ محلی را القا می‌کند و باعث می‌شود که لوله دریافت کننده خم شده و حتی به دریافت کننده آسیب برساند و در نتیجه قابلیت اطمینان آن را کاهش دهد. علاوه بر این، تغییر شکل لوله دریافت کننده نیز می‌تواند منجر به اتلاف انرژی شود.

انواع نیروگاه‌های دریافت کننده مرکزی بر اساس سیال عامل

پنج گزینه اصلی بر اساس سیال دریافت کننده و منبع ذخیره جهت انتخاب نوع نیروگاه خورشیدی حرارتی با دریافت کننده مرکزی وجود دارد. چهار گزینه اصلی عبارت از آب و بخار، نمک نیترات مذاب، سدیم مایع، و هوا می‌باشد. در گزینه پنجم سدیم مایع در دریافت کننده و نمک مذاب در منبع ذخیره استفاده می‌شود. شرح کلی آنها در جدول (۱) ارائه شده است. لازم به ذکر است که در اکثر نیروگاه‌های خورشیدی دریافت کننده مرکزی ساخته شده با سیال عامل آب و بخار مورد استفاده قرار گرفته است.



جدول ۱: ویژگی‌های نیروگاه‌های خورشیدی دریافت‌کننده مرکزی برحسب سیال عامل [۹]

سیال عامل	مزایا	معایب
آب و بخار	دسترسی به تجهیزات و تکنولوژی ساخت آن آسان می‌باشد. آشنایی با تکنولوژی طراحی آن وجود دارد. تجربیات موفقی از این نوع نیروگاه در جهان وجود دارد.	فشار بخار سیکل بالا است و کنترل آن اهمیت زیادی دارد. برخی تجهیزات نیروگاه به‌خصوص دریافت‌کننده آن، سنگین و بزرگ می‌باشد. سیستم ذخیره انرژی آن به سیال جداگانه (روغن با نمک مذاب) نیاز دارد. راه اندازی سیستم به زمان زیادی احتیاج دارد.
سدیم مایع	انتقال حرارت و شار حرارتی مجاز آن بسیار خوب است. ابعاد دریافت‌کننده در مقایسه با سایر سیالات کوچک‌تر است.	بسیار سمی است و با هوا و آب واکنش شدید می‌دهد. قدرت ذخیره کردن انرژی به دلیل سبک نبودن و ظرفیت حرارتی کم نسبت به نمک مذاب کمتر است. تجهیزات به‌کار رفته نظیر پمپ‌ها، شیرها و ... پیچیده‌تر از سیستم آب و بخار می‌باشند. کلیه تجهیزات که سدیم مایع در آنها جریان دارد به‌دلیل نقطه انجماد بالای سدیم نیاز به گرمایش دارند.
نمک مذاب	خواص انتقال حرارتی مناسبی دارد. قدرت ذخیره انرژی بسیار خوبی دارد.	اثرات خوردگی بر لوله‌ها و تجهیزات دیگر وجود دارد. جهت جلوگیری از انجماد نیاز به گرمایش کلیه تجهیزاتی که نمک مذاب در آنها جریان دارد وجود دارد. نسبت به سیستم آب و بخار تجهیزات به‌کار رفته در آن پیچیده‌تر می‌باشد.
هوا	اینرسی حرارتی کمتری دارد و شروع به‌کار سیستم زمان کمتری را نیاز دارد. تکنولوژی ساده‌ای با شارژ حرارتی مجاز بالایی دارد. نیاز به مواد مصرفی بسیار کمتری دارد. ایمنی بالاتری نسبت به انواع دیگر نیروگاه‌ها دارد.	به‌دلیل سبکی و هدایت حرارتی کم، انتقال حرارت با راندمان کمتر صورت می‌گیرد. در نتیجه نیاز به دریافت‌کننده مرکزی بزرگتری می‌باشد. سیستم ذخیره انرژی آن دارای هزینه زیاد و راندمان کمتری نسبت به سایر سیستم‌ها می‌باشد. به دلیل سطوح انتقال بیشتر، تلفات حرارتی در لوله و مولد بخار زیاد است.

توزیع دما و شار حرارتی دریافت‌کننده مرکزی

در دریافت‌کننده حفره‌ای برج خورشیدی شار حرارتی و توزیع دما بسیار ناهمگن می‌باشد [۱۰ و ۱۱]. بنابراین، بسیاری از محققین سعی در کاهش گرادیان شار حرارتی و اختلاف دمای پیرامونی لوله‌های دریافت‌کننده برای افزایش طول عمر و قابلیت اطمینان آن دارند. به‌طوری‌که، آنها استراتژی نقطه هدف بهینه را به‌جهت تغییر آرایش آینه‌های هلیوستات پیشنهاد نمودند که می‌تواند بهترین نقطه هدف را برای هر یک از آینه‌های هلیوستات به دست آورده و توزیع شار حرارتی لوله دریافت‌کننده را همگن نموده و در نهایت تنش حرارتی لوله دریافت‌کننده را کاهش دهد [۱۲-۱۴]. وانگ و همکاران [۱۵] روش جدیدی را با ترکیب روش ردیابی اشعه مونت کارلو و روش‌های گبهارت جهت شبیه‌سازی تابش خورشیدی برای یک دریافت‌کننده حفره‌ای خورشیدی ارائه نمودند. نتایج نشان داد که تاثیر حفره در همگن کردن توزیع شار خورشیدی در جذب سطحی پایین‌تر بیشتر است. پاسیو و همکاران [۱۶] موراکو و همکاران [۱۷] فلز مایع را به عنوان سیال انتقال حرارت به‌کار بردند که مزایای قابل توجهی در دریافت‌کننده برج مرکزی دارد که برای شار حرارتی توزیع یکنواخت موثر بود. شو و همکاران [۱۸] نوعی دریافت‌کننده برج خورشیدی با ساختار سرامیک فوم متخلخل را پیشنهاد نمودند که ضریب انتقال حرارت همرفت حجمی مطلوبی را جهت شبیه‌سازی خصوصیات انتقال حرارت یک دریافت‌کننده برج خورشیدی با محیط متخلخل به‌دست می‌آورد.

از طرف دیگر، محققین دیگری سعی در بهبود عملکرد دریافت‌کننده از طریق تغییر ساختار آن داشته‌اند. زو و همکاران [۱۹] یک دریافت‌کننده حفره‌ای استوانه‌ای جدید با عایق‌بندی متشکل از یک کف محصور شده در قسمت عقب، یک دریچه در قسمت جلو و یک لوله مارپیچی در داخل را توسعه دادند. ثابت شد که ساختار پیشنهادی قابلیت رسیدن به دماهای عملیاتی بالا و بازده حرارتی را دارا می‌باشد. یانگ و همکاران [۲۰] یک دریافت‌کننده لوله حرارتی تخت دو فاز با دمای بالا را پیشنهاد کردند که می‌تواند توزیع شار حرارتی را همگن و نقاط حرارتی بر روی آن را حذف کند. بعدها، کاناتانی و همکاران [۲۱] مدلی از دریافت‌کننده حفره خورشیدی با استفاده از لوله‌های مارپیچ به عنوان جاذب حرارت توسعه دادند. هندسه دریافت‌کننده مدل شبیه آزمایشی برای یک سیستم متمرکز خطی متقاطع بوده است، اگرچه این مدل پتانسیل کاربرد در همان نوع دریافت‌کننده را داشت. از برخورد توزیع شار خورشیدی



بر روی دیواره‌های داخلی دریافت‌کننده، توزیع شار جذب شده با استفاده از شبیه‌سازی نوری به دست می‌آید. با نادیده گرفتن تلفات حرارتی همرفتی از حفره، توزیع دمای سیال انتقال حرارت و لوله‌های سیم پیچ در حالت پایدار محاسبه گردید. دمای خروجی، حداکثر دمای لوله‌های سیم پیچ، افت فشار، تلفات حرارتی، راندمان دریافت‌کننده و قدرت پمپاژ مورد نیاز برای فشرده‌سازی سیال انتقال حرارت (هوا) ارزیابی گردید. آنها دریافتند بازدهی دریافت‌کننده در دماهای بالا و زمانی که انرژی تابشی دریافتی کم باشد کاهش می‌یابد. همچنین می‌توان از یک پمپ با توان کمتر در سیستم در مقایسه با خروجی توان الکتریکی استفاده کرد.

تغییر میدان جریان داخلی لوله دریافت‌کننده

به‌طور کلی، جریان سیال داخل لوله را می‌توان به دو دسته جریان مرزی^۱ و جریان مرکزی^۲ تقسیم نمود [۲۲]. جریان مرزی به جریان سیال در محدوده نزدیک دیوار شناخته می‌شود و بقیه جریان درون لوله به عنوان جریان مرکزی لوله تعریف می‌گردد. لوله‌های تقویت‌شده جهت افزایش نرخ انتقال حرارت انواع مختلفی را دارا می‌باشند [۲۳ و ۲۴]. این لوله‌ها شامل لوله با شیار مارپیچ^۳، لوله با شیار طولی^۴، لوله‌ی موج‌دار^۵، لوله با پره‌های داخلی^۶، لوله‌ی مارپیچ آجدار^۷، لوله با آج کوچک^۸ به‌عنوان طراحی مؤثر جهت افزایش سطح انتقال حرارت در جریان مرزی در نظر گرفته می‌شوند. همچنین این سطوح بهبود یافته بر انتقال حرارت جابجایی بین سیال و دیواره‌ی لوله تأثیر زیادی دارند. بنابراین این روش‌ها را می‌توان تقویت نرخ انتقال حرارت بر اساس سطح^۹ یا تقویت انتقال حرارت در جریان مرزی لوله نام‌گذاری نمود. در مقابل، تقویت انتقال حرارت در جریان مرکزی را می‌توان تقویت انتقال حرارت بر اساس سیال^{۱۰} نامید. مرسوم‌ترین روش افزایش نرخ انتقال حرارت در لوله روش سطح می‌باشد. در حالی که، این معیارها برای افزایش نرخ انتقال حرارت درون لوله نیز مناسب می‌باشند، از طرفی باعث اتلاف بیشتر ممنوم سیال و افزایش پیوسته سطح می‌گردند که این باعث افزایش مقاومت اصطکاکی و اتلاف ویسکوزیته بیشتر می‌شود و باعث افزایش ضریب اصطکاک و افت فشار در سیستم می‌گردد. اگر این افت فشار در سیستم بیش از اندازه افزایش یابد باعث کاهش سرعت سیال و کاهش نرخ انتقال حرارت جابجایی بین سیال و سطح می‌شود. برای غلبه بر این چالش روش انتقال حرارت سطح، چندین آزمایش جهت بهبود انتقال حرارت بر اساس تقویت سیال درون لوله انجام گردید [۲۵ و ۲۶]. لیو و همکاران [۲۷] اصول انتقال حرارت افزایش یافته در جریان مرکزی را برای تشکیل یک لایه مرزی حرارتی معادل در جریان لوله آرام توسعه یافته ارائه دادند. در نتیجه آن گرادیان دمای سیال نزدیک دیواره لوله را افزایش می‌یافت و به طبع انتقال حرارت بین لوله و سیال نیز بالا می‌رفت، ضمن اینکه این امر تأثیر قابل ملاحظه‌ای بر روی افت فشار در سیستم نداشت. ساها و همکاران [۲۸] ویژگی‌های انتقال حرارت جریان آرام و افت فشار در یک لوله دایره‌ای مجهز به عناصر نواری با فاصله منظم که توسط میله‌های دایره‌ای نازک متصل شده‌اند را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. این ویژگی‌ها توسط عدد رینولدز، عدد پراوندل، نسبت پیچش، نسبت فضا و نسبت قطر میله به لوله، کنترل می‌گردید. نتایج بدست آمده همبستگی برای ضریب اصطکاک و عدد ناسلت را نیز در پی داشت. همچنین با در نظر گرفتن میزان ثابت قدرت پمپاژ، میزان افزایش انتقال حرارت در نوارهای تابنده با فاصله منظم در مقابل نوارهای تابنده تمام قد به طور قابل ملاحظه‌ای در اعداد رینولدز بالا بهبود پیدا کرد. دیت و گابتوند [۲۹] روابطی برای پیش‌بینی خواص جریان آرام در لوله با نوارهای پیچ‌خورده با فواصل منظم ارائه دادند. با استخراج روابط برای پارامترهای مربوطه از پیش‌بینی‌های عددی قبلی جریان آرام در یک لوله حاوی یک نوار پیچ‌خورده تمام‌قد، معادله تکانه محوری برای جریان در لوله‌های حاوی عناصر نوار تابنده با فاصله منظم، یکپارچه گردید تا یک همبستگی برای ضریب اصطکاک برای انعکاس تأثیرات جریان‌های

¹ Boundary flow

² Core flow

³ Spiral grooved tube

⁴ Longitudinal troughed tube

⁵ Corrugated tube

⁶ Inner-finned tube

⁷ Spiral-ribbed tube

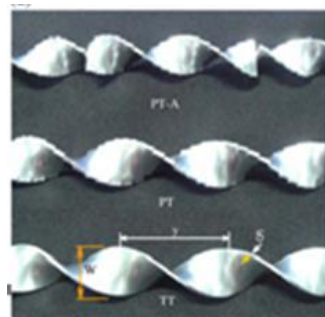
⁸ Micro-ribbed tube

⁹ Surface-based heat transfer enhancement

¹⁰ Fluid-based heat transfer enhancement



ثانویه و برش دیوار به دست آید. همچنین دریافتند به طور مشابه، با فرض وجود طول اختلاط در بخشی از فاصله بین عناصر نوار پیچ خورده متوالی، یک همبستگی برای عدد ناسلت ایجاد می‌شود. روابط همبستگی با داده‌های تجربی برای عدد پرانتل برابر ۵ مقایسه گردید و تطابق رضایت‌بخشی حاصل شد. چانگ و همکاران [۳۰] یک نوار پیچ‌خورده‌ی شکسته^۱ ساختند که می‌توانست باعث اختلاط بهتر شود. آنها گزارش کردند که در مقایسه با لوله با نوار پیچ‌خورده‌ی صاف، ضریب انتقال حرارت، ضریب اصطکاک متوسط فانیگ و ضریب عملکرد حرارتی لوله با نوار پیچ‌خورده شکسته به ترتیب تا $۲/۴-۱/۲۸$ ، $۴/۷-۲/۰$ و $۱/۸-۰/۹۹$ برابر، در محدوده‌ی عدد رینولدز $۱۰۰۰-۴۰۰۰۰$ افزوده شده است. نافون [۳۱] ویژگی‌های انتقال حرارت و افت فشار در لوله‌های دوتایی افقی با تعبیه نوار پیچ خورده را بررسی کرد. پژوهش شامل دو بخش و با زمینه‌های نسبی متفاوت انجام گرفت. قطر داخلی و خارجی لوله‌ها به ترتیب $۸/۱۰$ و $۹/۵۴$ میلی‌متر بود و یک نوار پیچ خورده آلومینیومی به ضخامت ۱ میلی‌متر و طول ۲۰۰۰ میلی‌متر مورد استفاده قرار گرفت. از آب سرد و گرم به ترتیب به عنوان سیال کار در سمت‌های پوسته و لوله استفاده شد. اجرای آزمایشی در نرخ جریان جرمی آب سرد و گرم به ترتیب بین $۰/۰۱$ و $۰/۰۷$ کیلوگرم بر ثانیه و بین $۰/۰۴$ و $۰/۰۸$ کیلوگرم بر ثانیه انجام گردید. دمای آب سرد و گرم ورودی به ترتیب بین ۱۵ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد و بین ۴۰ تا ۴۵ درجه سانتی‌گراد بوده است. وی نتایج بدست آمده در لوله پیچ خورده را با نتایج لوله بدون نوار پیچ خورده مقایسه نمود و نتایج حاصل نشان داد ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک لوله افقی به همراه نوار پیچ خورده بهترین عملکرد را داشتند. اکثر داده‌ها به ترتیب در $\pm ۱۵\%$ ، $\pm ۱۰\%$ از همبستگی‌های پیشنهادی برای ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک قرار داشتند. ایامسآرد و همکاران [۳۲] ویژگی‌های انتقال حرارت، اصطکاک جریان و ضریب عملکرد حرارتی در یک لوله مجهز به نوار تابیده شده با بال دلتا، با استفاده از آب به عنوان سیال کار، به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. تأثیرات نوار پیچ خورده مورب مثلث بال و نوار پیچ خورده مثلث بال مستقیم نیز در این تحقیق بررسی گردید. آزمایش‌ها با استفاده از نوارهایی با سه نسبت پیچش و سه نسبت عمق برش بال در محدوده اعداد رینولدز $۳۰۰۰-۲۷۰۰۰$ انجام شد. در یک لوله شار حرارتی دیواری یکنواخت، نتایج به دست آمده نشان می‌داد که میانگین عدد ناسلت و میانگین ضریب اصطکاک در لوله با نوار پیچش بال دلتا با کاهش نسبت پیچ خورده‌ی و افزایش عمق برش بال افزایش می‌یابد. در محدوده در نظر گرفته شده، عدد ناسلت، ضریب اصطکاک و ضریب عملکرد حرارتی در یک لوله با نوار پیچ خورده مورب مثلث بال به ترتیب $۱/۰۴-۱/۶۴$ ، $۱/۰۹-۱/۹۵$ و $۱/۰۵-۱/۱۳$ برابر در لوله با نوار پیچ خورده معمولی مشاهده گردید. سیماووت و همکاران [۳۳] اثر نوار پیچیده شده با برش محیطی با محور متناوب (PT - A) بر روی جریان سیال و مشخصه افزایش انتقال حرارت در یک لوله دایره‌ای شار حرارتی یکنواخت مطابق شکل (۲) به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. آزمایش‌ها با استفاده از آب به عنوان یک سیال آزمایشی در یک لوله با جریان آشفته که در آن عدد رینولدز از ۵۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ متغیر بود، انجام شد. نوار پیچیده شده با برش محیطی (PT) و نوار پیچیده شده معمولی (TT) نیز در شرایط مشابه برای مقایسه مورد آزمایش قرار گرفتند. آنها دریافتند نرخ انتقال حرارت در لوله متناسب با PT، PT - A و TT به ترتیب تا ۱۸۴% ، ۱۰۲% و ۵۷% از آن در لوله صاف افزایش می‌یابد. در محدوده عدد رینولدز حاضر تست شده، PT، PT - A و TT به ترتیب حداکثر عملکرد حرارتی را در توان پمپاژ ثابت $۱/۲۵$ ، $۱/۱۱$ و $۱/۰۲$ ارائه می‌داد.



(الف)



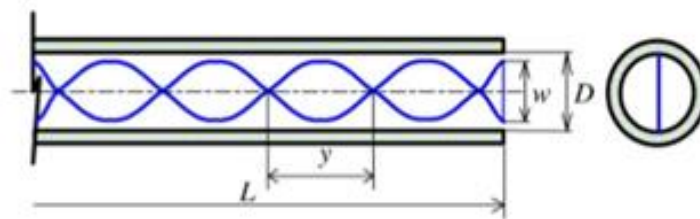
(ب)

شکل ۲: عکس‌ها و نورسنجی نوارهای پیچ‌خورده مختلف TT و PT-A [۳۳]

^۱ Broken twisted tape



ایامسآرد و همکاران [۳۴] جریان چرخشی و انتقال حرارت جابجایی را در یک لوله دایره‌ای با نوارهای پیچ‌خورده لقی^۱ مطابق شکل (۳) به صورت عددی مطالعه کردند. اثرات نسبت فضای خالی تعریف شده به صورت نسبت فضای خالی بین لبه نوار و دیواره لوله به قطر لوله ($CR=C/D$) بر روی افزایش عدد ناسلت، ضریب اصطکاک و ضریب عملکرد حرارتی به صورت عددی برای نوارهای پیچیده شده در دو نسبت پیچش (Y/W) مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. این شبیه‌سازی به منظور به دست آوردن درک رفتار فیزیکی جریان حرارتی و سیال در لوله مجهز به نوار پیچیده شده با تناسب آزاد تحت شرایط دمای دیواره ثابت در رژیم جریان آشفته برای عدد رینولدز در محدوده ۳۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ انجام گردید. نتایج عددی این تحقیق نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌های عدد ناسلت انتقال حرارت و ضریب اصطکاک براساس مدل‌های آشفتگی $k-\omega$ SST در توافق بهتری با منگلیک و برگل هستند. آنها دریافتند که نوار پیچیده شده برای نسبت پیچش ۲/۵ با CR بترتیب ۰/۳، ۰/۲، ۰/۱ می‌توانند نرخ انتقال حرارت را به ترتیب تا ۷۳/۶٪، ۴۶/۶٪، ۱۷/۵٪ افزایش دهند و فاکتورهای اصطکاک را به ترتیب تا ۳۳۰٪، ۲۶۲٪، ۱۸۹٪ در مقایسه با لوله‌های صاف افزایش دهند.



شکل ۳: هندسه لوله‌های گرد با درج نوار پیچ‌خورده لقی [۳۴]

گوآ و همکاران [۳۵] خواص انتقال حرارت و ضریب اصطکاک جریان آرام را در یک لوله دایره‌ای با قرار دادن نوار پیچ‌خورده در وسط خالی شده به‌طور عددی مطالعه کردند. نوار کج شده یک تکنیک به‌طور گسترده برای افزایش انتقال حرارت است. آنها یک نوار پیچیده شده مرکزی با هدف غربال کردن عملکرد خوب ترموهیدرولیکی پیشنهاد نمودند. آنها یک مطالعه مقایسه‌ای بین این نوع و نوار پیچیده شده با عرض کوتاه به صورت عددی در جریان‌های لوله‌ای آرام انجام دادند. نتایج محاسبات نشان داد که مقاومت جریان می‌تواند توسط هر دو روش کاهش یابد؛ با این حال، رفتارهای حرارتی بسیار متفاوت از یکدیگر هستند. همچنین برای لوله‌هایی با نوارهای پیچیده شده با عرض کوتاه، انتقال حرارت و عملکرد ترموهیدرولیکی با قطع لبه نوار ضعیف می‌گردید و برعکس، برای لوله‌هایی با نوارهای پیچیده شده در مرکز، انتقال حرارت حتی می‌تواند در مواردی که نسبت فضای خالی مرکزی مناسبی دارند، افزایش می‌یافت. ری و دیت [۳۶ و ۳۷] رفتار انتقال حرارت جابجایی در داکت مربعی با نوار پیچ‌خورده را به صورت عددی مطالعه کردند. در داکت‌های مربعی، نوار پیچ‌خورده به‌طور تناوبی با دیوار تماس پیدا می‌کند. این ساختار جریان چرخشی منقطع متناوب^۲ در گپ‌ها ایجاد می‌کند که باعث تغییر ساختار جریان در نزدیک دیوار می‌شود. بنابراین، این موضوع کارایی نوار پیچ‌خورده را در اعداد رینولدز بزرگ‌تر در مقایسه با لوله‌های دایره‌ای نشان می‌دهد. مشخصات پیش‌بینی شده عددی جریان آرام و انتقال حرارت از طریق مجرای مربعی با نوار پیچیده در این مقاله ارائه شده است. معادلات انتقال بر روی یک شبکه غیر متعامد با استفاده از نسخه منحنی الگوریتم^۳ تصحیح فشار کامل^۴ حل شده‌اند. هم جریان و هم انتقال حرارت در حالت توسعه دوره‌ای در جهت محوری هستند. ویژگی‌های انتقال حرارت تحت شرایط شار حرارتی ثابت محیطی و محوری دیواره پیش‌بینی می‌شوند. این مطالعه نشان می‌دهد که با استفاده از کانال مربعی، به ویژه در اعداد پرنتل بالاتر و نسبت‌های پیچش پایین‌تر، می‌توان به پیشرفت‌های قابل توجهی دست یافت. زیماپرو [۳۸ و ۳۹] خواص انتقال حرارت و ضریب اصطکاک لوله‌ی موج‌دار مارپیچی سه شروع و تک شروع^۴ با نوار پیچ‌خورده را به صورت تجربی مطالعه کرد. پارامترهای مشخصه لوله‌ها عبارتند از نسبت ارتفاع به قطر، و گام نسبی معادلات مربوط به معیارهای ارزیابی عملکرد گسترده برای

¹ Loose-fit twisted tape

² Center-cleared twisted tape

³ Periodical bursting swirl

⁴ Three-start and single-start spirally corrugated tube



سطوح انتقال حرارت جهت ارزیابی اثر ضرب‌پذیر مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بهینه ترمودینامیکی را می‌توان با به حداقل رساندن تعداد تولید آنتروپی در مقایسه با افزایش نسبی نرخ انتقال حرارت یا کاهش نسبی سطح انتقال حرارت تعریف کرد. ایشان پی برد که با این روش‌ها می‌توان به ضریب انتقال حرارت و عملکرد ترموهیدرولیکی بالاتری نسبت به لوله‌های صاف با نوار پیچ‌خورده دست‌یافت. پروموانگ و ایامسآرد [۴۰] یک نوار پیچ‌خورده با لبه‌های دنداندار ساختند. آزمایش آنها نشان داد که نرخ انتقال حرارت و ضریب عملکرد حرارتی در لوله با این نوع نوار پیچ‌خورده به ترتیب در حدود $1/27-1/04$ و $1/12-1/02$ برابر مقادیر آن در لوله یا نوار پیچ‌خورده صاف است. لیائو و شین [۴۱] خواص انتقال حرارت و ضریب اصطکاک را در لوله‌های با سطوح گسترش‌یافته داخلی سه‌بعدی و جایگذاری نوار پیچ‌خورده مطالعه کردند. نتایج تجربی نشان داد که این روش مزیت خاصی برای افزایش انتقال حرارت جابجایی برای جریان آرام سمت لوله برای سیال با ویسکوزیته‌ی بالا دارد.

اگرچه، همان‌گونه که اشاره گردید مقالات زیادی لوله‌های با نوار پیچ‌خورده را مورد بررسی قرار دادند، و اکثراً این مقالات روی عملکرد انتقال حرارت و مقاومت در برابر جریان تمرکز داشتند و مکانیزم تقویت انتقال حرارت بندرت گزارش شده است. بنابراین مطالعه مکانیزم‌های جدید تقویت انتقال حرارت که می‌تواند به‌عنوان راهنما برای بهینه‌سازی مبدل‌های حرارتی و طراحی دستگاه‌های تقویت انتقال حرارت جدید عمل کند، ارزشمند است.

گوآ و همکاران [۴۲ و ۴۳] اصل هم‌افزایی میدان^۱ را مطرح کردند که نشانگر این است که نرخ انتقال حرارت نه‌تنها به میدان سرعت و دما بستگی دارد بلکه به هم‌افزایی آنها که به انتگرال ضرب داخلی گرادیان دما و میدان سرعت مربوط است، نیز وابسته است. لیو و همکاران [۴۴ و ۴۵] اصل هم‌افزایی میدان گوآ و همکاران را توسعه دادند و پیشنهاد نمودند که یک رابطه هم‌افزایی دیگری بین کمیت‌های فیزیکی علاوه بر میدان سرعت و دما وجود دارد. بهبود روابط هم‌افزایی بین کمیت‌ها برای تقویت انتقال حرارت مفید است. همچنین گوآ و همکاران [۴۶] یک کمیت جدید بر اساس تشابه بین سیستم‌های الکتریکی و حرارتی معرفی کردند که با انرژی پتانسیل الکتریکی در خازن تطابق دارد. این کمیت انترنسی^۲ نامیده می‌شود که بیانگر انرژی پتانسیل کل انرژی حرارتی در یک جسم است. انتقال حرارت همیشه با انتقال انترنسی همراه است. انرژی حرارتی پایسته است درحالی‌که انترنسی به دلیل اتلاف، پایسته نیست. از اتلاف انترنسی می‌توان برای اندازه‌گیری برگشت‌ناپذیری فرآیند انتقال حرارت استفاده کرد. قاعده اکستریم اتلاف انترنسی توسط گوآ [۴۷] مطرح شد. منگ و همکاران [۴۸] بر اساس قاعده اکستریم اتلاف انترنسی، معادله ظرفیت بالقوه انتقال حرارت را به‌صورت عددی برای جریان سیال در لوله دایره‌ای مستقیم و جریان آرام توسعه‌یافته حل کردند و یک میدان جریان به‌صورت نظری مطلوب به دست آمد که در آن گردابه‌های چند طولی^۳ در سطح مقطع لوله‌ی دایره‌ای ظاهر گشتند. در ادامه، ساها و همکاران [۴۹] بررسی عرض نوار و قطر میله متصل‌کننده را روی انتقال حرارت و ویژگی‌های افت فشار در یک لوله دایره‌ای متناسب با عناصر نوار پیچیده شده با فواصل منظم به‌طور تجربی مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش جریان چرخشی آرام یک سیال ویسکوز که دارای محدوده متوسط عدد پرانتل است، در نظر گرفته شده‌است. چرخش به وسیله نوار پیچیده شده با فواصل منظم با یک پیچش در مازول نوار ایجاد کردند و نوارهای نازک را به وسیله میله‌های نازک دایره‌ای به هم متصل کردند و با تغییرات با عرض نوار و قطر میله حالت‌های مختلف جریان را بررسی کردند. بخش تست انتقال حرارت به صورت الکتریکی تحت شرایط مرزی شار حرارتی ثابت دیواره به‌صورت محوری و محیطی تحت شار حرارت قرار دادند. این پژوهش مشخص کرد که عرض باریک‌تر نوار منجر به عملکرد ترموهیدرولیکی بدتر می‌شود، درحالی‌که میله متصل‌کننده نازک‌تر باعث بهبود عملکرد می‌شود. بنابراین، او پیشنهاد داد که میله متصل‌کننده حذف شود و برای ثابت شدن نوار پیچ‌خورده قطعه‌قطعه شده لوله را پینچ^۴ کنند. جیسانکار و همکاران [۵۰] خصوصیات انتقال حرارت و ضریب اصطکاک سیستم آبگرمکن خورشیدی ترموسیفون را با نوار پیچ‌خورده یکسره و نوار پیچ‌خورده کوتاه با میله متصل‌کننده و بدون میله متصل‌کننده، مطالعه کردند. در آزمایش آن‌ها نوارهای پیچ‌خورده قطعه‌قطعه شده با چند چرخه پیچ استفاده شدند، درحالی‌که در بررسی‌های ساها و ایامسآرد نوارهای پیچ‌خورده قطعه‌قطعه شده تنها نیم چرخه پیچ داشتند. آنها دریافتند که نوارها چه با میله نگه داشته شوند

¹ Field synergy principle

² entransy

³ Multiple longitudinal vortices

⁴ Pinch



چه بدون آن، ضریب انتقال حرارت و ضریب اصطکاک برای نوار پیچ‌خورده قطعه‌قطعه شده هر دو خیلی کوچک‌تر از مقادیر آن برای نوار پیچ‌خورده یکسره بودند. به‌علاوه، عملکرد کلی برای نوار پیچ‌خورده قطعه‌قطعه شده متصل شده با میله بهتر از بدون میله بود. دیگر محققان رفتار انتقال حرارت جابجایی را در لوله‌هایی با نوار پیچ‌خورده با عرض کوتاه بررسی کردند. در این موارد، یک فاصله بین لبه نوار پیچ‌خورده با دیواره لوله وجود دارد که ممکن است منجر به کاهش مقاومت در برابر جریان شود. ایوب و الفهد [۵۱] اثر عرض فاصله بین نوار و دیواره را روی افت فشار در جریان مغشوش به‌صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داد که افزایش عرض فاصله می‌تواند به طرز مؤثری ضریب اصطکاک را کاهش دهد. چانگ و همکاران [۵۲] نوار پیچ‌خورده دندانه‌دار با دندانه‌های با مقطع مربعی در هر طرف را طراحی کردند. نسبت پیچش در دو طرف نوار پیچیده شده با نسبت پیچش $2/81, 1/88, 1/56$ یا دنده‌های مربعی برش خورده با گام دنده و ارتفاع دنده یکسان را مورد ارزیابی قرار دادند. مشخص گردید عدد ناسلت موضعی و ضریب اصطکاک فانیگ با کاهش نسبت پیچش در لوله متناسب با نوار پیچیده شده صاف یا نواری، افزایش می‌یابد. در محدوده مجدد رینولدز $5000 - 25000$ افزایش انتقال حرارت را در پی دارد. همچنین فاکتورهای اصطکاک فانیگ به ترتیب در لوله‌های مجهز به نوارهای پیچیده شده صاف و دندانه‌دار کاهش و افزایش می‌یابند. آنها براساس مصرف توان پمپاژ مشابه، عملکرد حرارتی لوله‌ها با نوارهای پیچیده صاف و دندانه‌دار را با هم مقایسه کردند و افزایش نرخ انتقال حرارت را در نوارهای پیچیده شده دندانه‌دار را گزارش دادند.

نتیجه‌گیری

اکثر مطالعات برای بهینه‌سازی دریافت کننده حفره‌ای برج خورشیدی بر آینه هلیوستات، سیال عامل و ساختار دریافت کننده متمرکز بوده، اما روش‌های معدودی برای کاهش اختلاف دمای پیرامونی از طریق تغییر میدان جریان داخلی لوله دریافت کننده وجود دارد. با این حال اضافه کردن برخی عناصر در لوله‌های دریافت کننده برای تغییر میدان جریان داخلی لوله دریافت کننده وجود دارد. با این حال اضافه کردن برخی عناصر در لوله‌های دریافت کننده برای تغییر میدان جریان داخلی لوله دریافت کننده وجود دارد. شار حرارتی و اختلاف دمای پیرامونی در سیستم دریافت کننده سهموی خورشیدی می‌باشد. چالش اصلی در طراحی و مبدل‌های حرارتی کمینه کردن مقاومت در برابر جریان در حین افزایش ضریب انتقال حرارت است. بنابراین، ایجاد یک نظریه و روش برای تقویت انتقال حرارت در جریان لوله برای بالا بردن عملکرد مبدل حرارتی ضروری است. اصول تقویت انتقال حرارت در جریان مرکزی لوله برای بهبود یکنواختی دما و کاهش مقاومت در برابر جریان که با تقویت انتقال حرارت در جریان مرزی درون لوله متفاوت است.

مراجع

- [1] Kalogirou, S., (2009), Solar energy engineering: process and systems, British library.
- [2] Chen, G.Q., (2011), Nonrenewable energy cost and green house gas emission of a 1.5MW solar power tower plant in china, Renewable and sustainable energy, Vol 15, pp 1961-1967.
- [3] Alexopoulos, S., Hoffschmid, B., (2010), Solar tower power plant in Germany and future perspectives of the development of the technology in Greece and Cyprus, Renewable Energy, pp 1352-1356.
- [4] Wagner, M., (2008), Simulation and predictive performance modeling of utility-scale central receiver system power plants, Master thesis, University of Wisconsin-Madison.
- [5] Bejan, A.D., (2003), Heat Transfer Handbook, John Wiley, New Jersey.
- [6] Giampietro, F., (1998), Heat transfer optimization in internally finned tubes under laminar flow conditions, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 41 pp 1243-1253.
- [7] Siddique, M., Alhazmy, M., (2008), Experimental study of turbulent single-phase flow and heat transfer inside a micro-finned tube, International Journal of Refrigeration, Vol. 31, pp 234-241.
- [8] Manglik, R.M., Bergles, A.E., (1993), Heat transfer and pressure drop correlations for twisted tape inserts in isothermal tubes, ASME Journal Heat Transfer, Vol. 115, pp 890-896.
- [9] Eiamsa-ard, S., Promvong, P., (2007), Heat transfer characteristics in a tube fitted with helical screw-tape with without core-rod inserts, International Communications in Heat and Mass Transfer, Vol. 34, pp176-185.



- [10] Yang K., Liu W., (2007), Forming an equivalent thermal boundary layer for fully developed laminar tube flow and its field synergy analysis, *Journal of Engineering Thermophysics*, Vol. 28, pp 283-285.
- [11] Salomé, A., Chhel F., Flamant, G., Ferrière, A., Thiery, F., (2013), Control of the flux distribution on a solar tower receiver using an optimized aiming point strategy: Application to THEMIS solar tower, *Solar Energy*, Vol. 94, pp 352-366.
- [12] Besarati, S.M., Yogi Goswami, D., Stefanakos, E.K., (2014), Optimal heliostat aiming strategy for uniform distribution of heat flux on the receiver of a solar power tower plant, *Energy Conversion Management*, Vol. 84, pp 234-243.
- [13] Ashley, T., Carrizosa, E., Fernández-Cara, E., (2017), Optimisation of aiming strategies in Solar power tower plants, *Energy*, Vol. 137, pp 285-291.
- [14] Collado, F.J., (2010), One-point fitting of the flux density produced by a heliostat, *Solar Energy*, Vol. 84, pp 673-684.
- [15] Wang, K., He, Y. L., Qiu, Y., Zhang, Y., (2016), A novel integrated simulation approach couples MCRT and Gebhart methods to simulate solar radiation transfer in a solar power tower system with a cavity receiver, *Renewable Energy*, Vol. 89, pp 93-107.
- [16] Pacio, J., Wetzel, T., (2013), Assessment of liquid metal technology status and research paths for their use as efficient heat transfer fluids in solar central receiver systems, *Solar Energy*, Vol. 93, pp 11-22.
- [17] Marocco, L., Cammi, G., Flesch, J., Wetzel, T., (2016), Numerical analysis of a solar tower receiver tube operated with liquid metals, *International Journal Thermal Science*, Vol. 105, pp 22-35.
- [18] Xu, C., Song, Z., Chen, L. D., Zhen, Y., (2011), Numerical investigation on porous media heat transfer in a solar tower receiver, *Renewable Energy*, Vol. 36, pp 1138-1144.
- [19] Zou, C., Zhang, Y., Falcoz, Q., Neveu, P., Zhang, C., Shu, W., Huang S., (2017), Design and optimization of a high-temperature cavity receiver for a solar energy cascade utilization system, *Renewable Energy*, Vol. 103, pp 478-489.
- [20] Yang, L., Zhou, R., Jin, X., Ling, X., Peng, H., (2016), Experimental investigate on thermal properties of a novel high temperature flat heat pipe receiver in solar power tower plant, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 109, pp 610-618.
- [21] Kanatani, K., Yamamoto, T., Tamaura, Y., Kikura, H., (2017), A model of a solar cavity receiver with coiled tubes, *Solar Energy*, Vol. 153, pp 249-261.
- [22] Liu, Y., Chen, Q., Hu, K., Hao, J.H., (2016), Flow field optimization for the solar parabolic trough receivers in direct steam generation systems by the variational principle, *International Journal Heat Mass Transfer*, Vol. 102, pp 1073-1081.
- [23] Mwesigye, A., Bello-Ochende, T., Meyer, J.P., (2014), Heat transfer and thermodynamic performance of a parabolic trough receiver with centrally placed perforated plate inserts, *Applied Energy*, Vol. 136, pp 989-1003.
- [24] Collado, F.J., (2010), One-point fitting of the flux density produced by a heliostat, *Solar Energy*, Vol. 84, pp 673-684.
- [25] Boerema, N., Morrison, G., Taylor, R., Rosengarten, G., (2013), High temperature solarthermal central-receiver billboard design, *Solar Energy*, Vol. 97, pp 356-368.
- [26] Dutta, P., (2017), High temperature solar receiver and thermal storage systems, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 124, pp 624-632.
- [27] Liu, W., Yang, K., (2008), Mechanism and numerical analysis of heat transfer enhancement in the core flow along a tube, *Science China Technological Sciences*, Vol. 51, 1195-1202.



- [28] Saha, S.K., Gaitonde, U.N., Date, A.W., (1989), Heat transfer and pressure drop characteristics of laminar flow in a circular tube fitted with regularly spaced twisted-tape elements, *Experimental Thermal Fluid Science*, Vol. 2 (1989) 310-322.
- [29] Date, A.W., Gaitonde, U.N., (1990), Development of correlations for predicting characteristics of laminar flow in a tube fitted with regularly spaced twisted-tape elements, *Experimental Thermal Fluid Science*, Vol. 3, pp 373-382.
- [30] Chang, S.W., Yang, T.L., Liou, J.S., (2007), Heat transfer and pressure drop in tube with broken twisted tape insert, *Experimental Thermal Fluid Science*, Vol. 32, pp 489-501.
- [31] Naphon, P., (2006), Heat transfer and pressure drop in the horizontal double pipes with and without twisted tape insert, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 33, pp166-175.
- [32] Eiamsa-ard, S., Wongcharee, K., Eiamsa-ard, P., Thianpong, C., (2010), Heat transfer enhancement in a tube using delta-winglet twisted tape inserts, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 30, pp 310-318.
- [33] Seemawute, P., Eiamsa-ard, S., (2010), Thermohydraulics of turbulent flow through a round tube by a peripherally-cut twisted tape with an alternate axis, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp 652-659.
- [34] Eiamsa-ard, S., Wongcharee, K., Sripattanapipat, S., (2009), 3-D numerical simulation of swirling flow and convective heat transfer in a circular tube induced by means of loose-fit twisted tapes, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, pp 947-955.
- [35] Guo, J., Fan, A., Zhang, X., Liu, W., (2011), A numerical study on heat transfer and friction factor characteristics of laminar flow in a circular tube fitted with center-cleared twisted tape, *International Journal Thermal Science*, Vol. 50, pp 1263-1270.
- [36] Ray, S., Date, A.W., (2001), Laminar flow and heat transfer through square duct with twisted tape insert, *International Journal Heat Fluid Flow*, Vol. 22, pp 460-472.
- [37] Ray, S., Date, A.W., (2003), Friction and heat transfer characteristics of flow through square duct with twisted tape insert, *International Journal Heat Mass Transfer*, Vol. 46, pp 889-902.
- [38] Zimparov, V., (2001), Enhancement of heat transfer by a combination of three-start spirally corrugated tubes with a twisted tape, *International Journal Heat Mass Transfer*, Vol. 44, pp 551-574
- [39] Zimparov, V., (2002), Enhancement of heat transfer by a combination of a single-start spirally corrugated tubes with a twisted tape, *Experimental Thermal Fluid Science*, Vol. 25, pp 535-546.
- [40] Promvonge, P., Eiamsa-ard, S., (2007), Heat transfer behaviors in a tube with combined conical-ring and twisted-tape insert, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 34, pp 849-859.
- [41] Liao, Q., Xin, M.D., (2000), Augmentation of convective heat transfer inside tubes with three-dimensional internal extended surfaces and twisted-tape inserts, *Chemical Engineering Journal*, Vol. 78, pp 95-105.
- [42] Guo, Z.Y., Li, D.Y., Wang, B.X., (1998), A novel concept for convective heat transfer enhancement, *International Journal Heat Mass Transfer*, Vol. 41, pp 2221-2225.
- [43] Guo, Z.Y., Tao, W.Q., Shah, R.K., (2005), The field synergy (coordination) principle and its applications in enhancing single phase convective heat transfer, *International Journal Heat Mass Transfer*, Vol. 48, pp 1797-1807.
- [44] Liu, W., Liu, Z.C., Guo, Z.Y., (2009), Physical quantity synergy in laminar flow field of convective heat transfer and analysis of heat transfer enhancement, *Chinese Bulletin Science*, Vol. 54, pp 3579-3586.



- [45] Liu, W., Liu, Z.C., Ming, T.Z., Guo, Z.Y., (2009), Physical quantity synergy in laminar flow field and its application in heat transfer enhancement, *International Journal Heat Mass Transfer*, Vol. 52, pp 4669-4672.
- [46] Guo, Z.Y., Zhu, H.Y., Liang, X.G., (2007), Entransy e a physical quantity describing heat transfer ability, *International Journal Heat Mass Transfer*, Vol. 50, pp 2545-2556.
- [47] Guo, Z.Y., (2008), New physical quantities in heat, *Journal Engineering Thermophys*, Vol. 29, pp 112-114.
- [48] Meng, J.A., Liang, X.G., Li, Z.X., (2005), Field synergy optimization and enhanced heat transfer by multi-longitudinal vortexes flow in tube, *International Journal Heat Mass Transfer*, Vol. 48, pp 3331-3337
- [49] Saha, S.K., Dutta, A., Dhal, S.K., (2001), Friction and heat transfer characteristics of laminar swirl flow through a circular tube fitted with regularly spaced twisted tape elements, *International Journal Heat Mass Transfer*, Vol. 44, pp 4211-4223.
- [50] Jaisankar, S., Radhakrishnan, T.K., Sheeba, K.N., (2009), Experimental studies on heat transfer and friction factor characteristics of thermosyphon solar water heater system fitted with spacer at the trailing edge of twisted tapes, *Journal Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp1224-1231.
- [51] Ayub, Z.H., Al-Fahed, S.F., (1993), The effect of gap width between horizontal tube and twisted tape on the pressure drop in turbulent water flow, *International Journal Heat Fluid Flow*, Vol. 14, pp 64-67.
- [52] Chang, S.W., Jan, Y.J., Liou, J.S., (2007), Turbulent heat transfer and pressure drop in tube fitted with serrated twisted tape, *International Journal Thermal Science*, Vol. 46, pp 506-518.