



Performance Analysis of a Parabolic Solar Receiver with Twisted Tape in an Absorber Tube (Effect of Number and Thickness of Twisted Tape)

Alireza Teymoori¹, Mohammad Sadegh Abedinejad^{2*}

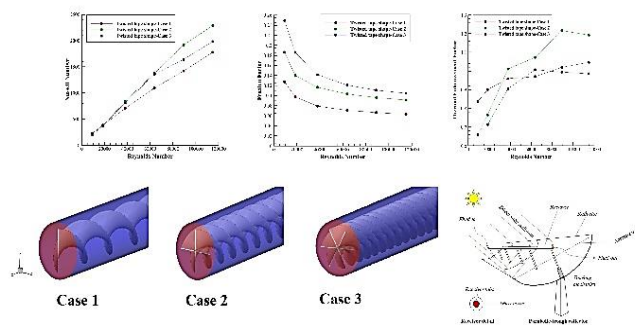
¹MSc, Faculty of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. Email Address: a_teymoori@alumni.iust.ac.ir

²Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, Alzahra University, Tehran, Iran (Correspondence). Email Address: m.abedinejad@alzahra.ac.ir

HIGHLIGHTS

- Increase in Nusselt number with increasing Reynolds number
- Maximum Nusselt number in the case of two twisted tapes and maximum Reynolds number
- Existence of an optimal twisted ribbon thickness

GRAPHICAL ABSTRACT



ARTICLE INFO

Article history:

Article Type: Research paper

Received: 07 June 2025

Received in revised form: 10 August 2025

Accepted: 02 September 2025

Available online: 29 September 2025

Keywords:

Parabolic Solar Receiver

Twisted Tape

Collector

Number of Twisted Tape

Thickness of Twisted Tape

ABSTRACT

In this paper, the effect of the number and thickness of the twisted tapes in the absorber tube of a parabolic trough solar collector on its performance characteristics is numerically investigated. The simulation of the solar collector is carried out under fully developed fluid flow conditions and the realizable $k-\epsilon$ turbulence model. The geometric parameters including the twist ratio (0.5 and 0.1), the twist tapes thickness (1, 1.5, 2 mm) and the number of twisted tapes (1, 2, 3) and the Reynolds number (including 5 levels) as another parameter are also investigated. With a 100% decrease in the twist ratio (from 1 to 0.5), the Nusselt number increases by an average of 15%. For any given number and thickness of the tapes, the friction factor and Nusselt number decrease and increase, respectively, with increasing Reynolds number. At Reynolds numbers above 89,000, the Nusselt number changes by approximately 35% with changing the number of tapes. The lowest friction factor is achieved in the case of one tape and the highest Reynolds number, and the highest Nusselt number is achieved in the case of two tapes at the highest Reynolds number. Increasing the thickness of the tape from 1 to 1.5 mm causes an approximate increase of 8% to 16% in the friction factor, 17% in the Nusselt number, and 13.74% in the heat transfer factor. This is while increasing the thickness from 1.5 to 2 mm does not have much effect on the friction factor, Nusselt number, and heat transfer factor. As the Reynolds number increases, the effect of the thickness of the twisted tapes on the friction coefficient, Nusselt number, and heat transfer factor increases.

Cite this article: Teymoori A, Abedinejad MS. Performance Analysis of a Parabolic Solar Receiver with Twisted Tape in an Absorber Tube (Effect of Number and Thickness of Twisted Tape). *Aerospace Mechanics*. 2025; 21(3):83-100. DOI:https://maj.ihu.ac.ir/article_210445.html

© Author(s) retain the copyright and full publishing rights

Publisher: Imam Hossein University.



OPEN ACCESS



تحلیل عملکرد یک گیرنده سهموی خورشیدی با نوارهای پیچشی در لوله جاذب (تأثیر تعداد و ضخامت نوار پیچشی)

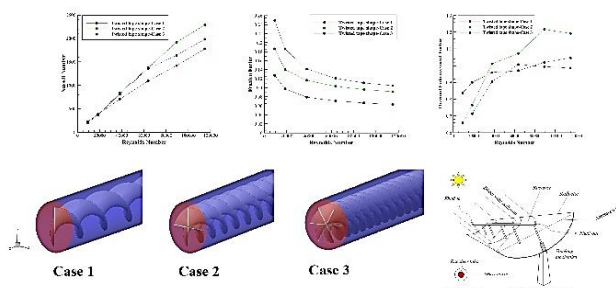
علیرضا تیموری^۱، محمدصادق عابدی نژاد^{۲*}

^۱ کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران. رایانامه: a_teymoori@alumni.iust.ac.ir
^۲ استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران. (نویسنده مسئول). رایانامه: m.abedinejad@alzahra.ac.ir

برجسته‌ها

- افزایش عدد ناسلت با افزایش عدد رینولدز
- بیشترین عدد ناسلت در حالت دو نوار پیچشی و بیشترین عدد رینولدز
- وجود یک ضخامت نوار پیچشی بهینه

چکیده گرافیکی



مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

نوع مقاله: علمی پژوهشی
 دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۷
 بازنگری: ۱۴۰۴/۰۵/۱۹
 پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۱
 ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۷/۰۷

کلیدواژه‌ها:

گیرنده خورشیدی سهموی
 نوار پیچشی
 کلکتور
 تعداد نوار پیچشی
 ضخامت نوار پیچشی

چکیده

در این مقاله به بررسی عددی تأثیر تعداد و ضخامت نوار پیچشی در لوله جاذب یک گیرنده سهموی خورشیدی بر مشخصه‌های عملکردی آن پرداخته شده است. شبیه‌سازی گیرنده خورشیدی در شرایط کاملاً توسعه یافته جریان سیال و با استفاده از مدل آشفتگی $k-\epsilon$ realizible انجام شده است. پارامترهای هندسی شامل نسبت پیچش (۰/۵ و ۱/۰)، ضخامت نوار پیچشی (۱، ۱/۵، ۲ میلی‌متر) و تعداد نوارهای پیچ خورده (۱، ۲، ۳) و عدد رینولدز (شامل ۵ سطح) نیز به عنوان یک پارامتر دیگر مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با کاهش ۱۰۰٪ نسبت پیچش (از ۱ به ۰/۵)، عدد ناسلت به طور میانگین ۱۵٪ افزایش می‌یابد. در هر حالت مشخص از تعداد و ضخامت نوار پیچشی، با افزایش عدد رینولدز، فاکتور اصطکاک و عدد ناسلت به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابند. در اعداد رینولدز بالای ۸۹۰۰۰، عدد ناسلت با تغییر تعداد نوار پیچشی به میزان تقریبی ۳۵٪ تغییر می‌کند. کمترین فاکتور اصطکاک در حالت یک نوار پیچشی و بیشترین عدد رینولدز و بیشترین عدد ناسلت در بالاترین عدد رینولدز و در حالت دو نوار پیچشی قابل دستیابی است. افزایش ضخامت نوار پیچشی از ۱ به ۱/۵ میلی‌متر سبب افزایش تقریبی ۸٪ الی ۱۶٪ در فاکتور اصطکاک، ۱۷٪ در عدد ناسلت و ۱۳/۷۴٪ در فاکتور ازدیاد حرارت می‌گردد. این در حالی است که با افزایش ضخامت از ۱/۵ به ۲ میلی‌متر تأثیر چندانی بر فاکتور اصطکاک، عدد ناسلت و فاکتور ازدیاد حرارت مشاهده نمی‌شود. با افزایش عدد رینولدز تأثیرگذاری ضخامت نوار پیچشی بر ضریب اصطکاک، عدد ناسلت و فاکتور ازدیاد حرارت بیشتر می‌گردد.

استناد: تیموری علیرضا، عابدی‌نژاد محمدصادق. تحلیل عملکرد یک گیرنده سهموی خورشیدی با نوارهای پیچشی در لوله جاذب (تأثیر تعداد و ضخامت نوار پیچشی). هوا فضا، (۱۴۰۴)، ۲۱(۳): ۱۰۰-۸۳. DOI: https://maj.ihu.ac.ir/article_210445.html

نویسنده(گان) حق نشر و حقوق کامل انتشار را برای خود محفوظ می‌دارند. ©



ناشر: دانشگاه جام امام حسین(ع). OPEN ACCESS

		<u>فهرست علائم</u>	
T_f	دمای سیال		
T_{ri}	میانگین دمای دیواره داخلی	c_p	ظرفیت حرارتی ویژه
u	سرعت	C_R	نسبت تمرکز
u_m	میانگین سرعت سیال در لوله	d_{ri}	قطر داخلی لوله جاذب (cm)
W	عرض نوار پیچشی	d_{ro}	قطر خارجی لوله جاذب (cm)
\tilde{W}	نسبت عرضی پیچش	f	ضریب اصطکاک
x	جابجایی	f_p	ضریب اصطکاک برای حالت بدون نوار پیچشی
\tilde{y}	نسبت پیچش	G_k	تولید انرژی جنبشی آشفتگی
حروف یونانی		h	ضریب انتقال حرارت جابجایی
χ	فاکتور افزایش انتقال حرارت	H	نسبت گام
τ_g	ضریب انتقال پوشش شیشه‌ای	I_b	تابش نرمال مستقیم ($W m^{-2}$)
α_r	ضریب جذب لوله جاذب	k	انرژی جنبشی
ρ	چگالی ($kg m^{-3}$)	K	دمای ورودی
φ_r	زاویه رینگ (درجه)	L	طول لوله
λ	ضریب هدایت حرارتی ($W m^{-1} K^{-1}$)	Nu	عدد ناسلت
δ_{ij}	تانسور تنش	Nu_p	عدد ناسلت برای حالت بدون نوار پیچشی
μ	لزجت دینامیکی	ΔP	اختلاف فشار
ν	لزجت سینماتیکی	q''	شار حرارتی
ξ	ضریب صدور تشعشعی	Re	عدد رینولدز
μ_t	لزجت گردابه	S_{ij}	نرخ تغییر شکل خطی المان سیال
ε	اضمحلال گردابه‌ای	T_{bulk}	دمای حجمی سیال
η	نسبت زمان مشخصه آشفتگی		

۱- مقدمه

ناسلت با پیچشی کردن لوله و نوار افزایش یافته است. بیشترین مقدار ضریب عملکرد در حالتی به حاصل شده که عدد رینولدز در پایین ترین مقدار است.

برای جلوگیری از هرگونه نقطه داغ و تخریب احتمالی سیال انتقال حرارت، استفاده از نوار پیچشی جدا شده از دیوار گزینه‌ای جذاب برای افزایش انتقال حرارت برای گیرنده‌های سهموی است [۱۱]. ایوب و الفهد [۱۲] برای اولین بار یک بررسی تجربی در مورد اصطکاک سیال برای درج‌های نوار پیچ‌خورده که جدا از دیوار قرار داده شده‌اند، گزارش کردند. سها و همکاران [۱۳] باهدف بهبود انتقال حرارت از یک نوار پیچشی یکپارچه و فاصله گرفته از دیوار استفاده کردند و نشان دادند که اگر نوار پیچشی بافاصله درون لوله قرار گیرد، ضریب اصطکاک و انتقال حرارت کاهش می‌یابد. جیسانکار و همکاران [۱۴] انتقال حرارت یک آبگرم کن خورشیدی با قرار دادن نوار پیچشی به دو صورت بافاصله از زانویی لوله و نوار به همراه یک زائده میله‌ای را مورد آزمایش قرار دادند. نتایج نشان داد که نوار پیچشی با میله ضریب عملکرد بهتری به همراه دارد.

ایماسارد و همکاران [۱۵] افزایش انتقال حرارت بالا را در کمترین نسبت پیچش و کوچک‌ترین نسبت فاصله نوارهای پیچشی در یک لوله گزارش کرده‌اند. فاکتورهای اصطکاک با افزایش نسبت فاصله (clearance) کاهش می‌یابند. باس و اوزجیحان [۱۶] یک تحقیق تجربی در مورد استفاده از نوارهای پیچشی که جدا از دیوار قرار داده شده بودند، ارائه کردند. نسبت‌های پیچشی ۲،۰، ۲،۵، ۳،۰، ۳،۵ و ۴،۰ نسبت‌های فاصله ۰،۰۱۷۸ و ۰،۰۳۵۷ و اعداد رینولدز در محدوده ۵۱۳۲ و ۲۴۹۸۹ استفاده نموده‌اند. نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که بیشترین افزایش انتقال حرارت در کمترین نسبت پیچش و بیشترین نسبت فاصله وجود دارد. ژانگ و همکاران [۱۷] نتایج یک شبیه‌سازی عددی برای گردابه‌های چند طولی در یک لوله القاشده توسط نوارهای پیچشی سه‌گانه و چهارگانه جدا از دیواره لوله ارائه کرده‌اند. اعداد ناسلت ۱۷۱٪ و ۱۸۲٪ برای نوارهای پیچشی سه‌گانه و چهارگانه افزایش یافت درحالی‌که افزایش متناظر در فاکتورهای اصطکاک به ترتیب ۴/۰۶ و ۷/۰۲ برابر بود.

ایمسا و همکاران [۱۸] تأثیر گام‌های مختلف نوار پیچشی دوگانه بر انتقال حرارت را به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی کردند. نتایج نشان داد که هرچه مقدار گام کمتر باشد، شدت جریان چرخشی و انرژی جنبشی آشفتگی بیشتر شده و در نتیجه انتقال حرارت افزایش می‌یابد. ایسما و پرومونگ [۱۹] تأثیر زوایای پیچش نوار پیچشی (۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه) و نحوه

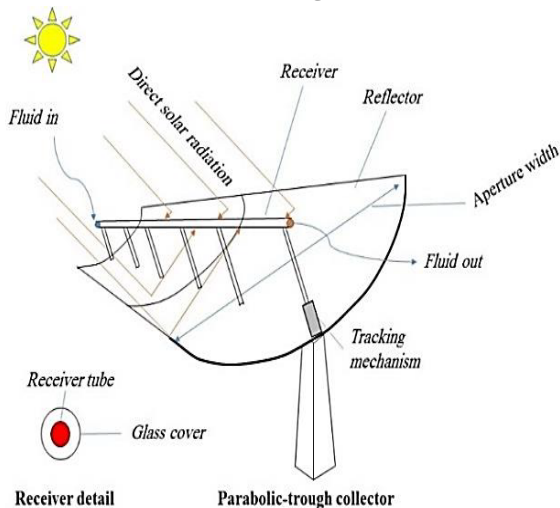
گیرنده‌های سهموی خورشیدی از نظر تجاری و فنی توسعه یافته‌ترین فناوری برای متمرکزسازی انرژی خورشیدی می‌باشند. ابتکارات تحقیقاتی متعددی برای بهبود بیشتر عملکرد و کاهش هزینه انرژی از این دستگاه‌ها انجام شده است و همچنان ادامه دارد [۱]. دسترسی به مواد سبک‌وزن، افزایش اندازه متمرکز کننده و ازدیاد انتقال حرارت در لوله جاذب یکی از راه‌های بهبود عملکرد و کاهش هزینه‌ها است. ازدیاد انتقال حرارت در لوله‌های جاذب دارای مزایای متعددی مانند کاهش وزن و سایز آن، کاهش دمای دستگاه و کاهش اختلاف دمای بین سیال درون لوله جاذب و هوای اطراف است. در گیرنده‌های سهموی، عدم یکنواختی دمای محیطی لوله جاذب منجر به تنش‌های حرارتی می‌شود و در موارد اختلاف دمای محیطی لوله جاذب زیاد می‌تواند باعث شکستگی پوشش شیشه‌ای گیرنده شود [۲]. علاوه بر این، هر چه دمای لوله جاذب بالاتر باشد، تلفات حرارتی گیرنده بیشتر است. لذا افزایش انتقال حرارت در گیرنده‌های سهموی از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. با افزایش انتقال حرارت، می‌توان از نرخ جریان پایین‌تر استفاده کرد و از دمای خروجی میدان کلکتور بالاتر اطمینان حاصل کرد و در عین حال اختلاف دمای محیطی لوله جاذب را کاهش داد.

فن‌های افزایش انتقال حرارت غیرفعال یک روش جذاب برای افزایش انتقال حرارت است؛ زیرا هیچ ورودی مستقیم توان مورد نیاز نیست. چندین محقق [۲-۴] برخی از فن‌های افزایش انتقال حرارت غیرفعال را برای بهبود عملکرد گیرنده‌های سهموی استفاده کرده‌اند. نوارهای پیچشی با توجه به سهولت ساخت و نصب و همچنین افزایش قابل توجه انتقال حرارت که با فاکتورهای اصطکاک متوسط قابل دستیابی است، به طور گسترده در بسیاری از کاربردها استفاده شده است [۵، ۶]. باین حال، این روش معمولاً با محدودیت‌هایی مانند افزایش ضریب اصطکاک یا افت فشار همراه است که می‌بایست در ارزیابی‌ها مورد توجه قرار گیرد. بنابراین در طراحی نوار پیچشی بایستی تعادل و سازشی بین افزایش افت فشار و ازدیاد انتقال حرارت برقرار گردد. [۷، ۸]. ریوسایریبل و همکاران [۹] مطالعه‌ای بر روی نوار پیچشی در رینولدزهای پایین انجام دادند. تحقیقات ایشان نشان داد که نوار جریان چرخشی ایجاد می‌کند و این عامل باعث افزایش گرادیان سرعت در اطراف دیواره لوله می‌شود که انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد. فرنام و همکاران [۱۰] یک مطالعه آزمایشگاهی بر روی لوله دارای نوار مارپیچی انجام دادند. ضریب اصطکاک و عدد

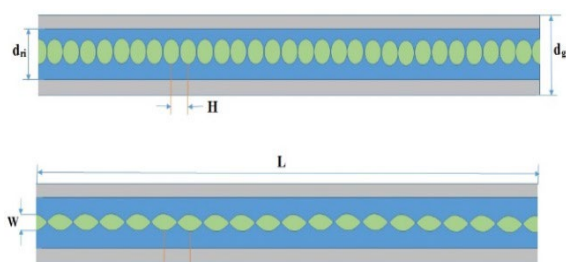
برافزایش انتقال حرارت در گیرنده‌های سهموی با نوارهای پیچشی جداشده از دیوار در شرایط مختلف فیزیک جریان سیال گزارش نشده است. بنابراین، هدف اصلی این مطالعه، بررسی عملکرد حرارتی یک گیرنده سهموی با درج‌های نواری جداشده از دیواره با ضخامت جسم‌های میانی مختلف، تعداد مختلف نوار پیچشی در شرایط رینولدز جریان متفاوت برای تعیین شرایط بهینه برای تولید دستیابی به نرخ انتقال حرارت بالا و افت فشار پایین است.

۲- مدل فیزیکی

شکل ۱ مدل فیزیکی یک گیرنده سهموی همراه با لوله جاذب را نشان می‌دهد. اطراف لوله جاذب یک پوشش شیشه‌ای قرار دارد. درون لوله جاذب، یک نوار پیچشی جدا از دیوار قرار داده شده است که در شکل ۲ قابل مشاهده است. در مدل فیزیکی، نوار پیچشی معمولاً با استفاده از اتصالات تفلونی متناسب با ضخامت و عرض نوار، از دیواره لوله فاصله گرفته و ثابت می‌شوند [۱۶]. مقدار و فشار هوا در فضای حلقوی بین لوله جاذب و پوشش شیشه‌ای بسیار کم است و تنها انتقال حرارت تشعشع در نظر گرفته می‌شود. به منظور حل دقیق‌تر جریان داخل لوله جاذب، کل لوله جاذب شبیه‌سازی می‌گردد.



شکل (۱): طرح‌واره یک گیرنده سهموی



شکل (۲): مدل فیزیکی لوله جاذب با نوار پیچشی

پیچش به صورت پادساعت‌گرد و ساعت‌گرد را بر انتقال حرارت روی سه مدل مختلف نوار پیچشی مورد بررسی تجربی قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد با افزایش زاویه پیچش، انتقال حرارت بیشتر می‌شود و همچنین چرخش ساعت‌گرد و پادساعت‌گرد نسبت به حالت معمولی عملکرد بهتری دارد. هنگ و همکاران [۲۰] نوارهای پیچشی با نسبت‌های مختلف درون یک لوله مارپیچ را به صورت تجربی بررسی کردند و بیشترین ضریب عملکرد حرارت در حالت بالاترین نسبت پیچش به دست آمده است.

ساروانان و همکاران [۲۱] استفاده از دو نوار پیچشی با برش مربعی و وی شکل درون یک لوله آب‌گرم‌کن خورشیدی مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که انتقال حرارت در نوار برش مربعی کمتر از وی شکل است. سلمان و همکاران [۲۲-۲۴] به صورت عددی نوارهای پیچشی، با فل‌دار، برش‌های مربعی و وی شکل بر روی لوله مورد بررسی قرار دادند که در همه حالات، انتقال حرارت نسبت به حالت معمول با افزایش همراه بوده است.

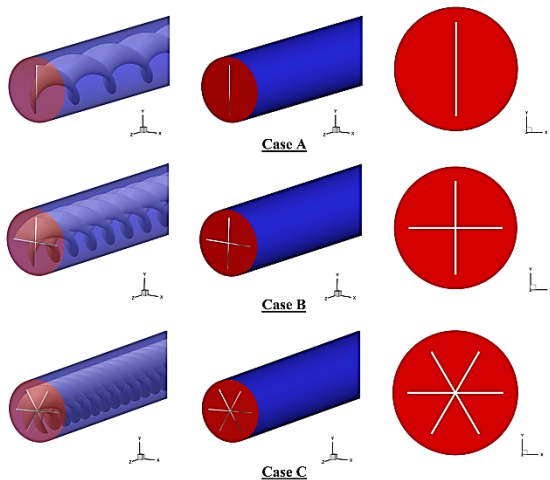
شیلادی و همکاران [۲۵] تأثیر پوشش آب‌گریز بر روی نوارهای پیچشی بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که این پوشش موجب افزایش تلاطم جریان، بهبود انتقال حرارت و کاهش افت فشار در کلکتور سهموی می‌شود. پژوهش تجربی مهتا و همکاران [۲۶] نشان داد که استفاده از نوارهای پیچشی دوگانه در مقایسه با نوع منفرد، منجر به افزایش بیشتر بازده حرارتی و تلاطم جریان در لوله جاذب می‌شود. در یک پژوهش جامع، اوکتولا [۲۷] به تحلیل عملکرد نوری، حرارتی و ترمودینامیکی کلکتور سهموی با نسبت تمرکز بالا پرداخت. در این مطالعه، از دو روش غیرفعال (نوار پیچ‌خورده اصلاح شده) و فعال (چرخش لوله گیرنده) به صورت ترکیبی استفاده شد. نتایج حاکی از آن بود که استفاده هم‌زمان از این دو فن می‌تواند نرخ انتقال حرارت را تا ۷۳٪ افزایش و تولید آنتروپی را تا ۲۷٪ کاهش دهد. پهلوانیان و همکاران [۲۸] با به‌کارگیری ترکیب نوارهای پیچشی و نانو سیالات در یک مدل عددی، به بررسی اثر این ترکیب بر عملکرد کلکتور سهموی پرداختند. نتایج این پژوهش نیز افزایش قابل توجهی در نرخ انتقال حرارت و بازده حرارتی و همچنین کاهش تولید آنتروپی را نشان داد.

بر اساس مطالعات ارائه شده در بالا، چندین پیکربندی از نوارهای پیچشی برای افزایش انتقال حرارت بررسی شده است. با این حال، افزایش انتقال حرارت بالقوه با نوار پیچشی جداشده از دیوار با تعداد نوارهای پیچشی مختلف بررسی نشده است. علاوه بر این، هیچ مطالعه‌ای در خصوص تأثیر ضخامت نوار پیچشی

پیچشی مشاهده می‌گردد. در حالت اول، یک نوار پیچشی، حالت دوم، دو نوار پیچشی با زاویه ۹۰ درجه با یکدیگر و در حالت سوم سه نوار پیچشی با زاویه ۶۰ درجه نسبت به دیگری در لوله جذب قرار گرفته‌اند. همچنین برای حالت اول، سه ضخامت مختلف برای نوار پیچشی نیز در نظر گرفته شده است.

جدول (۲): تغییرات اعمالی بر هندسه اصلی

مقدار	پارامتر
1	تغییر ضخامت پره‌ها (mm)
1.5	
2	
یک پره	تغییر حالت فیزیکی پره‌ها
دو پره	
سه پره	
9200	تغییر عدد رینولدز
18500	
38000	
63750	
89250	
115000	



شکل (۳): هندسه نوارهای پیچشی مورد استفاده در شبیه‌سازی

به‌منظور بررسی استقلال نتایج نسبت به تعداد سلول‌های محاسباتی، هندسه‌های مختلف به چهار شبکه محاسباتی متفاوت گسسته سازی شده‌اند. به‌عنوان مثال شکل ۴ تأثیر تعداد سلول‌های محاسباتی (از ۱۶۳۴۹۹ تا ۷۸۵۴۰۸) بر تغییرات عدد ناسلت را برای حالت هندسی یک نوار پیچشی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که اختلاف میان شبکه‌بندی اول (۱۶۳۴۹۹ سلول) با دوم (۲۹۷۱۸۱ سلول) و همچنین دوم با سوم

ابعاد گیرنده همانند گیرنده‌های تجاری موجود است [۲۹]. لوله جاذب دارای قطر داخلی $d_{ri} = 6.6 \text{ cm}$ ، قطر خارجی $d_{ro} = 7.0 \text{ cm}$ است در حالی که پوشش شیشه‌ای گیرنده دارای قطر داخلی $d_{gi} = 11.5 \text{ cm}$ است. اطلاعات هندسی و سایر پارامترهای شبیه‌سازی مورد استفاده در این مطالعه در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول (۱): پارامترهای شبیه‌سازی

مقدار	پارامتر
6.6	قطر داخلی لوله جاذب (cm)
0.2	ضخامت لوله جاذب (cm)
0.97	ضریب انتقال پوشش شیشه‌ای (τ_g)
0.96	ضریب جذب لوله جاذب (α_r)
0.96	چگالی (ρ, kgm^{-3})
1000	تابش نرمال مستقیم (I_b, Wm^{-2})
86	نسبت تمرکز (C_R)
80	زاویه رینگ (φ_r) (درجه)
0.5 – 1	نسبت پیچش (\tilde{y})
0.76	نسبت عرضی (\tilde{W})
0.001 – 0.0015 – 0.002	ضخامت نوار پیچشی (m)
$9.2 \times 10^3 - 1.15 \times 10^5$	عدد رینولدز (Re)
400	دمای ورودی (K)

به جهت مقایسه بین مدل فیزیکی و شبیه‌سازی شده، پارامترهای بدون بعد هندسی نسبت پیچش و نسبت عرض نوار پیچشی بدون بعد تعریف شده‌اند. نسبت پیچش به صورت نسبت گام (H) از طریق چرخش ۱۸۰ درجه‌ای به قطر داخلی لوله جاذب تعریف می‌گردد:

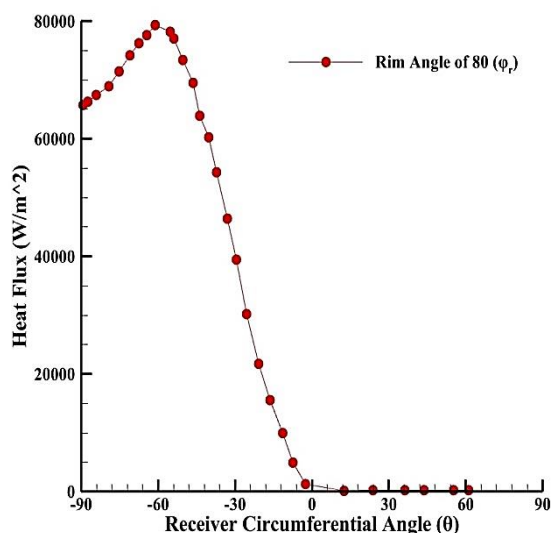
$$\tilde{y} = \frac{H}{d_{ri}} \quad (1)$$

نسبت عرض نوار پیچشی بدون بعد (\tilde{W})، فاصله بین نوار پیچ‌خورده و دیواره لوله جاذب را مشخص می‌کند. برای فاصله صفر بین لوله و نوار پیچشی، $\tilde{W} = 1$ خواهد بود.

$$\tilde{W} = \frac{W}{d_{ri}} \quad (2)$$

در جدول ۲ و شکل ۳ حالات مختلف مورد بررسی و تغییرات اعمال شده بر هندسه اصلی مشاهده می‌گردد. در مطالعه حاضر سه شکل مختلف از نوار پیچشی جدا از دیوار بررسی شده است. در شکل زیر نمای جانبی سه حالت مختلف قرارگیری نوارهای

شرط مرزی ورودی به صورت دما و سرعت ثابت بوده و شرط مرزی دیواره شار ثابت و بر اساس شکل ۶ است. دیواره‌های لوله جاذب داخلی بدون لغزش و بدون نفوذ در نظر گرفته می‌شوند. میانگین دمای پوشش شیشه‌ای مورد استفاده با شرایط مرزی تابش به طور جداگانه در هر دمای سیال و عدد رینولدز تعیین شده است. برای این منظور از یک مدل گیرنده کامل بدون نوارهای پیچشی استفاده شده است. دیواره بیرونی پوشش شیشه‌ای در این مدل گیرنده دارای یک شرایط مرزی مختلط است تا هم انتقال حرارت تابش و هم انتقال حرارت جابجایی را در نظر بگیرد. گیرنده گرما را با محیط از طریق تشعشع مبادله می‌کند.



شکل (۶): شار حرارتی روی لوله جاذب گیرنده به عنوان تابعی از زاویه محیطی لوله جاذب و زاویه رینگ کلکتور سیال انتقال حرارت مورد استفاده *SYL THERM 800* است [۳۱]. خواص ترموفیزیکی آن در دمای 400 K در جدول ۳ نشان داده شده است. فولاد ضدزنگ به عنوان جنس لوله جاذب استفاده شده است و ضریب صدور تشعشعی لوله جاذب به صورت زیر با دما متغیر است [۳۲].

$$\xi = 0.000327(T + 273.15) - 0.065971 \quad (3)$$

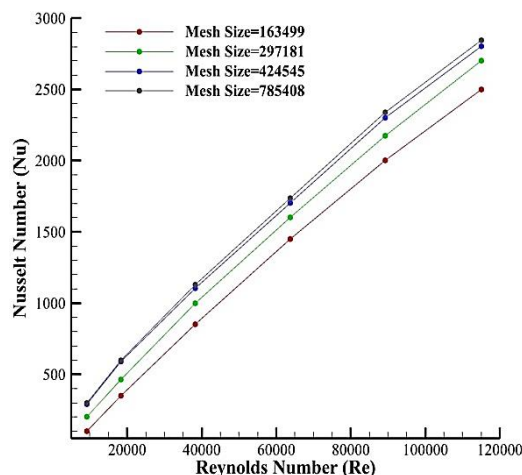
که در آن T دمای لوله جاذب برحسب درجه سانتی‌گراد است.

جدول (۳): مشخصات انتقال حرارتی سیال [۳۱]

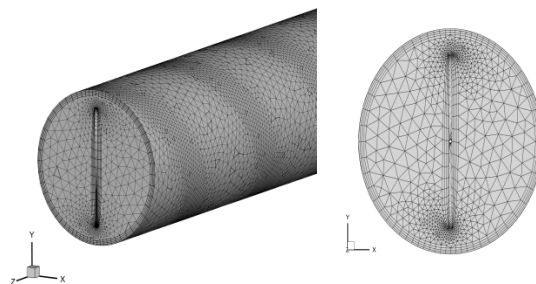
$T_f = 400\text{ K}$	
840	چگالی (kg m^{-3})
0.002164	لزجت (Pa s)
0.1148	ضریب هدایت حرارتی ($\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$)
1791.64	ظرفیت گرمایی ویژه ($\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$)

(۴۲۴۵۴۵ سلول) بیشتر از یک درصد بوده، اما، شبکه محاسباتی سوم با شبکه محاسباتی چهارم (۷۸۵۴۰۸ سلول) اختلافی زیر یک درصد دارد. به همین دلیل شبکه محاسباتی سوم با تعداد سلول محاسباتی ۴۲۴۵۴۵ با توجه به دقت و هزینه محاسباتی به عنوان شبکه محاسباتی نهایی حالت اول انتخاب می‌شود. شبکه نهایی مورد استفاده برای حالت یک نوار پیچشی در شکل ۵ نشان داده شده است. شبکه‌بندی به صورتی انجام شده است که در نواحی نزدیک به دیواره شبکه ریز تر باشد تا مقدار y^+ در محدوده ۱ تضمین گردد.

دیواره بیرونی لوله جاذب یک شار حرارتی غیریکنواخت دریافت می‌کند. توزیع شار حرارتی مورد استفاده در این مطالعه که از بسته نرم‌افزار *SolTrace* استخراج گردیده در شکل ۶ نشان داده شده است [۳۰]. برای این مطالعه، زاویه رینگ (ϕ_r) 80° و عرض دیافراگم 6 m در نظر گرفته شده است. زاویه گیرنده (θ)، زاویه محیطی گیرنده است که در امتداد بخش مثبت محور y 90° است. تابش نرمال مستقیم 1000 w/m^2 در نظر گرفته شده است.



شکل (۴): بررسی استقلال نتایج از تعداد سلول محاسباتی



شکل (۵): شبکه‌بندی نهایی هندسه برای حالت یک نوار پیچشی

$$\frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (۸)$$

$$G_k = -\overline{\rho u_i' u_j'} \frac{\partial u_j}{\partial x_i} = \mu_t S^2$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \epsilon - \rho C_2 \frac{\epsilon^2}{k + \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{\rho}}} \quad (۹-الف)$$

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right], \quad \eta = S \frac{k}{\epsilon} \quad (۹-ب)$$

$$S = \sqrt{2 S_{i,j} S_{i,j}}, \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (۹-ج)$$

$$S_{i,j} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (۹-د)$$

$$C_2 = 1.9, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.2 \quad (۹-د)$$

پارامتر G_k معرف تولید انرژی جنبشی آشفتگی، η نسبت زمان مشخصه آشفتگی به زمان مشخصه میدان جریان، k انرژی جنبشی، ϵ نرخ اضمحلال، μ_t لزجت گردابه و $S_{i,j}$ نرخ تغییر شکل خطی المان سیال است.

۴- روش حل عددی

شبیه‌سازی حالات مختلف هندسی در بسته نرم‌افزاری ANSYS FLUENT و گسسته‌سازی معادلات حاکم با رویکرد حجم محدود انجام شده است. دامنه محاسباتی با استفاده از سلول‌های شش‌وجهی گسسته شده است. اتصال فشار و سرعت با الگوریتم SIMPLE انجام شده است [۳۷]. طرح‌های مرتبه دوم جهت مخالف برای ادغام معادلات حاکم و همراه شرایط مرزی در حوزه محاسباتی به کار گرفته شده است. برای دستیابی به دقت بالای گرادینان‌ها در نواحی دیوار نزدیک، مقدار y^+ نزدیک به ۱ برای همه شبیه‌سازی‌ها منظور گردیده است. هم‌چنین از مدل Enhanced wall Treatment برای مدل‌سازی مناطق نزدیک دیوار استفاده شده است. همگرایی معادلات با رسیدن مقادیر باقیمانده‌های مقیاس شده ممنوم، انرژی جنبشی اغتشاش، نرخ اتلاف آشفتگی و انرژی کمتر از 10^{-7} و برای معادله پیوستگی، کمتر از 10^{-5} لحاظ شده است.

۳- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان آشفتگی و پایا درون لوله جاذب عبارت‌اند از معادلات پیوستگی و متوسط‌گیری شده رینولدز ممنوم و انرژی که به شرح زیر است:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (۴)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \delta_{ij} - \overline{\rho u_i' u_j'} \right] \quad (۵)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j c_p T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x_j} + \frac{\mu_t}{\sigma_{h,t}} \frac{\partial (c_p T)}{\partial x_j} \right) + u_j \frac{\partial P}{\partial x_j} + \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \delta_{ij} - \overline{\rho u_i' u_j'} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (۶)$$

که $-\overline{\rho u_i' u_j'}$ بیانگر تنش‌های رینولدز، u نشانگر متوسط زمانی مؤلفه سرعت، T متوسط زمانی دما، P متوسط زمانی فشار و λ ضریب هدایت حرارتی سیال است. تنش‌های رینولدز بر اساس تقریب بوزینسک به گرادینان‌های متوسط سرعت مرتبط می‌شوند.

$$-\overline{\rho u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \delta_{ij} \quad (۷)$$

که k انرژی جنبشی آشفتگی بر مقدار جرم واحد است. این رویکرد هزینه محاسباتی را در مقایسه با حل معادلات انتقال برای هر جمله در تانسور تنش رینولدز کاهش می‌دهد. بر اساس مطالعات پیشین [۳۳-۳۶] و اعداد بالای رینولدز، از مدل $k-\epsilon$ برای بسته شدن معادلات و محاسبه تنش رینولدز استفاده شده است. این مدل به دلیل فرمول‌بندی بهبودیافته معادله ϵ ، تضمین مثبت بودن لزجت آشفتگی و دقت بیشتر در پیش‌بینی جریان‌های چرخشی، جداشونده و با گرادینان بالای سرعت، نسبت به مدل‌های استاندارد $k-\epsilon$ برتری دارد. هم‌چنین این مدل پایداری عددی بهتری را در حل معادلات فراهم می‌کند. معادلات این مدل به شرح زیر است:

۵- نتایج و بحث

نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل عددی با استفاده از پارامترهای زیر ارائه می‌شود.

میانگین ضریب انتقال حرارت از طریق رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$h = \frac{q''}{T_{ri} - T_{bulk}} \quad (10)$$

که T_{ri} میانگین دمای دیواره داخلی لوله جاذب است و T_{bulk} نشان‌دهنده دمای حجمی سیال در مرزهای تناوبی است. میانگین عدد ناسلت توسط رابطه زیر حاصل می‌گردد:

$$Nu = h \frac{d_{ri}}{\lambda} \quad (11)$$

که در آن، λ ضریب هدایت حرارتی سیال است. عدد رینولدز جریان به صورت تعریف می‌شود.

$$Re = \frac{u_m d_{ri}}{\nu} \quad (12)$$

که در آن ν ویسکوزیته سینماتیک سیال انتقال حرارت و u_m میانگین سرعت سیال در لوله است. ضریب اصطکاک به این صورت تعریف می‌شود:

$$f = \frac{\Delta P}{0.5 \rho u_m^2 \frac{L}{d_{ri}}} \quad (13)$$

فاکتور افزایش انتقال حرارت χ برای ارزیابی عملکرد حرارتی در پمپاژ ثابت به صورت زیر تعریف می‌شود [۳۸]:

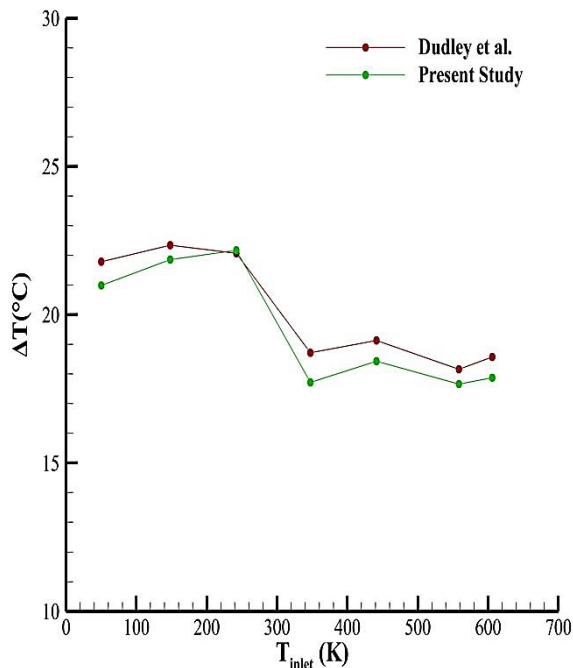
$$\chi = \left(Nu / Nu_p \right) / \left(f / f_p \right)^{(1/3)} \quad (14)$$

زیر نویس p بیانگر ضریب اصطکاک و عدد ناسلت برای لوله جاذب ساده بدون نوار پیچشی است.

۵-۱- اعتبارسنجی نتایج عددی

در شکل ۷ به مقایسه نتایج شبیه‌سازی پژوهش حاضر با نتایج پژوهش دودلی و همکاران [۲۹] پرداخته می‌شود. در این نمودار محور عمودی مقدار گرمای به‌دست‌آمده یا اختلاف دمای ورودی با خروجی است و محور افقی دمای ورودی سیال برحسب کلونین

(K) را نشان می‌دهد. در این اعتبارسنجی مقدار دمایی که سیال در پژوهش حاضر به دست آورده است با مقدار دمای به‌دست‌آمده یعنی مقدار دمای خروجی سیال در پژوهش دودلی و همکاران مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که اختلاف نتایج کمتر از ۵ درصد است.



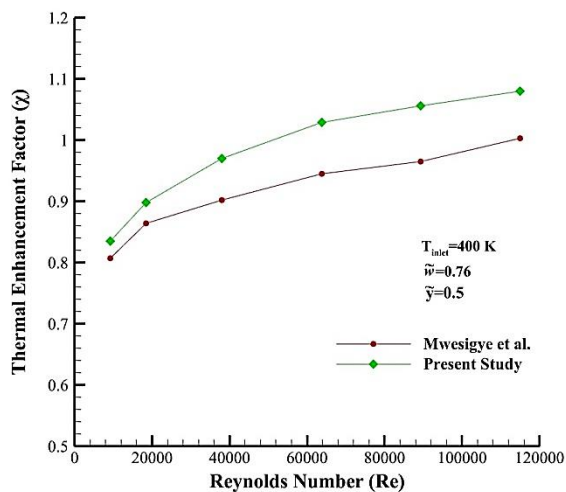
شکل (۷): مقایسه مقدار دمای به‌دست‌آمده در شبیه‌سازی حاضر با

داده پژوهشی دودلی و همکاران

از داده‌های وسگی و همکاران نیز جهت اعتبارسنجی نتایج عددی حاضر و مقایسه فاکتور اصطکاک، عدد ناسلت و فاکتور افزایش حرارت در نسبت عرضی $\tilde{W} = 0.76$ و نسبت پیچشی $\tilde{\gamma} = 0.5$ ، در دمای سیال ورودی 400 K در حالت تک نوار پیچشی استفاده شده است [۳۹]. مقایسه نشان می‌دهد مقدار اختلاف نتایج کمتر از ۱۰ درصد است.

شکل ۸ به مقایسه توزیع ضریب اصطکاک برحسب اعداد رینولدز مختلف با داده‌های پژوهشی وسگی [۳۹] می‌پردازد. مشاهده می‌شود اختلاف بین نتایج کمتر از ۵ درصد است. اکثر فن‌های افزایش انتقال حرارت، عملکرد انتقال حرارت را بهبود می‌بخشند، اما با یک اصطکاک سیال اضافی همراه است. برای این مطالعه، تغییر اصطکاک سیال با اعداد رینولدز نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود فاکتور اصطکاک با کاهش عدد رینولدز افزایش می‌یابد. افزایش اصطکاک سیال به دلیل افزایش مقاومت جریان در نتیجه جریان چرخشی، برخورد به لوله جاذب و همچنین انسداد جریان توسط نوار پیچشی است.

انتقال حرارت در توان پمپاژ ثابت استفاده می‌شود. هنگامی که قدرت پمپاژ یک نگرانی است، فن‌های تقویت با فاکتورهای بالاتر از یک، به‌عنوان روش مؤثر افزایش انتقال حرارت در نظر گرفته می‌شوند. شکل ۱۰ به مقایسه توزیع فاکتور ازدیاد حرارت برحسب اعداد رینولدز مختلف با داده‌های پژوهشی وسگی [۳۹] می‌پردازد. مشاهده می‌شود اختلاف بین نتایج کمتر از ۱۰ درصد است. این اختلاف در اعداد رینولدز بالاتر بیشتر است. دلیل این موضوع می‌تواند ناشی از تأثیرپذیری این ضریب به‌صورت هم‌زمان از توزیع سرعت و توزیع دما درون لوله جاذب باشد. با مقایسه شکل ۸ و ۱۰ مشاهده می‌شود که فاکتور ازدیاد حرارت از عدد رینولدز تأثیرپذیری بیشتری نسبت به ضریب اصطکاک دارد.

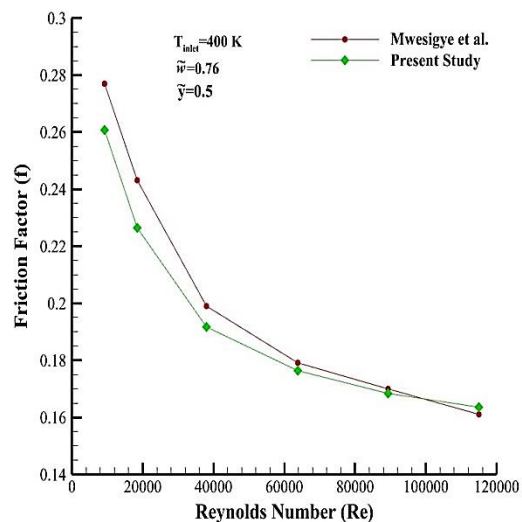


شکل (۱۰): مقایسه فاکتور ازدیاد حرارت مطالعه حاضر با داده پژوهشی وسگی و همکاران

۵-۲- بررسی تأثیر نسبت پیچش (\tilde{W}) بر مشخصه‌های عملکردی یک گیرنده سهموی خورشیدی در اعداد رینولدز مختلف

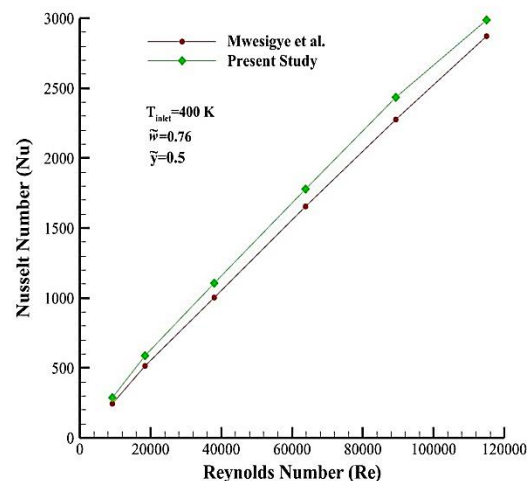
در این بخش عدد ناسلت و فاکتور افزایش حرارت در نسبت عرضی $\tilde{W} = 0.76$ و نسبت‌های پیچشی $\tilde{y} = 0.5$ و $\tilde{y} = 1$ در دمای سیال ورودی 400 K در حالت تک نوار پیچشی در اعداد رینولدز مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

شکل ۱۱ تغییر اصطکاک سیال برحسب عدد رینولدز برای دو نسبت پیچش مختلف نشان داده شده است. در هر دو حالت نسبت پیچش، ضریب اصطکاک با عدد رینولدز رابطه عکس دارد و توزیع ضریب اصطکاک برحسب عدد رینولدز به‌صورت یک منحنی سهموی با تقعر رو به بالا مشاهده می‌شود. با افزایش



شکل (۸): مقایسه فاکتور اصطکاک مطالعه حاضر با داده پژوهشی وسگی و همکاران

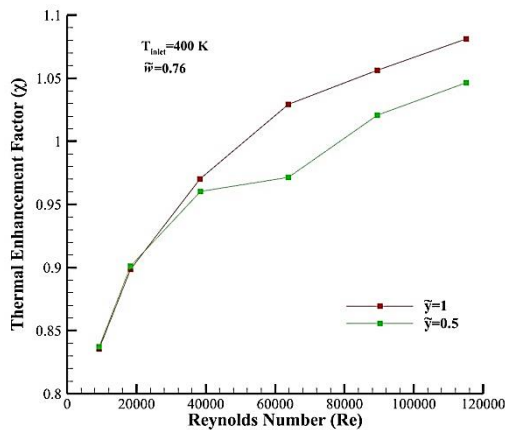
شکل ۹ به مقایسه توزیع عدد ناسلت برحسب اعداد رینولدز مختلف با داده‌های پژوهشی وسگی [۳۹] می‌پردازد که بیانگر این است که اختلاف بین نتایج کمتر از ۳ درصد است. این اختلاف تقریباً با افزایش عدد رینولدز با یک شیب کم‌رشد می‌کند.



شکل (۹): مقایسه عدد ناسلت مطالعه حاضر با داده پژوهشی وسگی و همکاران

دلیل این موضوع می‌تواند ناشی از تأثیرپذیری عدد ناسلت از عدد رینولدز و ضریب اصطکاک به‌صورت هم‌زمان باشد که اثرات خطای محاسباتی عدد رینولدز و ضریب اصطکاک بر عدد ناسلت در نهایت تقریباً به‌صورت یک ضریب ثابت در آمده است. مشاهده می‌شود عدد ناسلت با عدد رینولدز تقریباً یک رابطه خطی دارند و با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت نیز افزایش می‌یابد. فاکتور ازدیاد حرارت به‌عنوان یک ابزار اولیه برای مقایسه فن‌های افزایش

شکل ۱۳ به مقایسه توزیع فاکتور ازدیاد حرارت برحسب اعداد رینولدز مختلف در دو عدد نسبت پیچش مختلف $\bar{\gamma} = 0.5$ و $\bar{\gamma} = 1$ می‌پردازد. مشاهده می‌گردد با افزایش ۱۰۰٪ نسبت پیچش، فاکتور ازدیاد حرارت به مقدار ناچیزی کاهش می‌یابد. هرچند در هر دو حالت فاکتور ازدیاد حرارت با افزایش عدد رینولدز به صورت یک منحنی سهموی با شیب کم افزایش می‌یابد. در نسبت پیچش کمتر، مسیر سیال طولانی‌تر است و بنابراین اختلاط کافی منجر به بهبود عملکرد انتقال حرارت می‌شود.

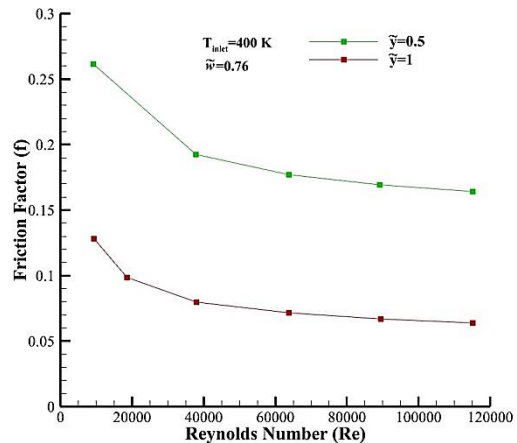


شکل (۱۳): مقایسه تأثیر نسبت پیچش ($\bar{\gamma} = 0.5$ و $\bar{\gamma} = 1$)

بر فاکتور ازدیاد حرارت یک گیرنده سهموی خورشیدی در اعداد رینولدز مختلف در حالت $W=0.76$, $T=400$ روند افزایشی فاکتور ازدیاد حرارت می‌تواند به دلیل عملکرد بالاتر انتقال حرارت در نتیجه اختلاط شدید سیال با افزایش اعداد رینولدز باشد. سیال دمای بالا در نیمه پایینی لوله جذب گیرنده جابجا شده و با سیال دمای پایین از نیمه بالایی لوله جایگزین می‌شود که منجر به انتقال حرارت بیشتر به سیال با دمای پایین می‌شود. از بررسی شکل‌های ۱۱ الی ۱۳ می‌توان نتیجه گرفت که با نسبت پیچش کم ($\bar{\gamma}$)، انتظار می‌رود عملکرد انتقال حرارت افزایش یابد، اما اصطکاک سیال نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، ترکیبی از نسبت‌های پیچش کمتر و نسبت‌های عرض کوچک‌تر می‌تواند نرخ انتقال حرارت نسبتاً بالا و افت فشار متوسط را به همراه داشته باشد. علاوه بر این، نسبت پیچش کمتر، تلاطم و اختلاط سیال بهتری را در لوله جذب گیرنده با توجه به شار حرارتی غیریکنواخت بر روی آن ایجاد می‌کند. بنابراین، برای این مطالعه، عملکرد یک گیرنده سهموی باتصال نوار پیچشی با نسبت پیچش در محدوده $\bar{\gamma} = 0.5$ و نسبت عرض در محدوده $\bar{W} = 0.76$ بررسی شده است. سه نوع شکل نوار پیچشی مختلف

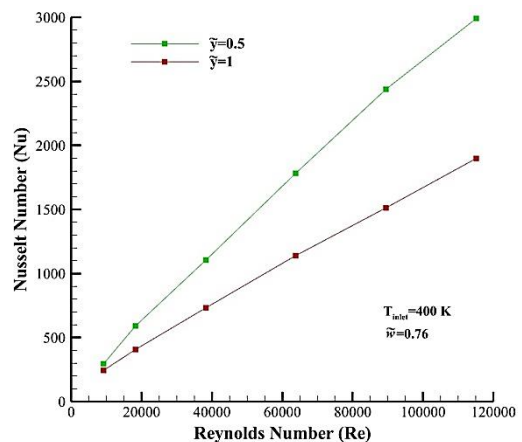
نسبت پیچش، ضریب اصطکاک کاهش می‌یابد. به نحوی که با افزایش ۱۰۰٪ نسبت پیچش، ضریب اصطکاک به طور میانگین ۵۰٪ کاهش می‌یابد.

شکل ۱۴ به مقایسه توزیع عدد ناسلت برحسب اعداد رینولدز مختلف در دو عدد نسبت پیچش مختلف $\bar{\gamma} = 0.5$ و $\bar{\gamma} = 1$ می‌پردازد. مشاهده می‌گردد با کاهش نسبت پیچش به دلیل افزایش طول لوله مارپیچی که سیال باید بپوشاند، افزایش اختلاط سیال و افزایش شدت آشفتگی، میانگین اعداد ناسلت افزایش می‌یابد. به نحوی که با کاهش ۱۰۰٪ نسبت پیچش، عدد ناسلت به طور میانگین ۱۵٪ افزایش می‌یابد. در اعداد رینولدز پایین تأثیر نسبت پیچش بر عدد ناسلت ناچیز است؛ اما در اعداد رینولدز بالاتر از ۱۰۰۰۰ نسبت پیچش بر عدد ناسلت تأثیرگذار است.



شکل (۱۱): مقایسه تأثیر نسبت پیچش ($\bar{\gamma} = 0.5$ و $\bar{\gamma} = 1$)

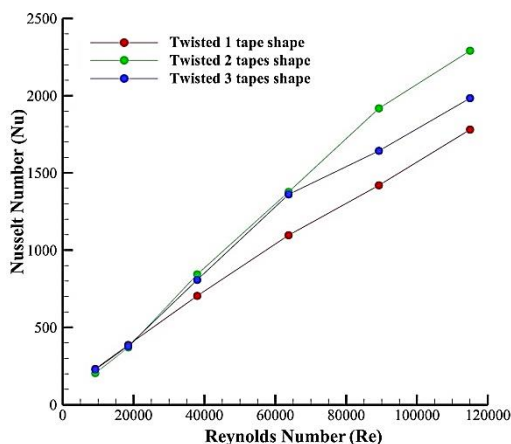
بر ضریب اصطکاک یک گیرنده سهموی خورشیدی در اعداد رینولدز مختلف در حالت $W=0.76$, $T=400$



شکل (۱۲): مقایسه تأثیر نسبت پیچش ($\bar{\gamma} = 0.5$ و $\bar{\gamma} = 1$)

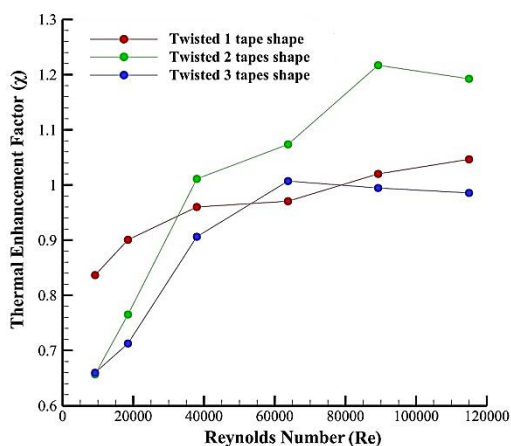
بر عدد ناسلت یک گیرنده سهموی خورشیدی در اعداد رینولدز مختلف در حالت $W=0.76$, $T=400$

تعداد مشخص از نوار پیچشی، با افزایش عدد رینولدز، عدد ناسلت افزایش می‌یابد. در اعداد رینولدز پایین (کمتر از ۳۰۰۰۰)، تعداد نوار پیچشی اثرگذاری چندانی بر عدد ناسلت ندارند و عدد ناسلت به تغییر تعداد نوار پیچشی وابستگی کمی دارد. در اعداد رینولدز بالای ۸۹۰۰۰، عدد ناسلت با تغییر تعداد نوار پیچشی به میزان تقریبی ۳۵٪ تغییر می‌کند. نتایج فوق نشان می‌دهد که بیشترین عدد ناسلت در بالاترین عدد رینولدز و در حالت دو نوار پیچشی قابل‌دستیابی است.



شکل (۱۵): بررسی تأثیر تعداد نوار پیچشی بر عدد ناسلت یک گیرنده سهموی خورشیدی در اعداد رینولدز مختلف

شکل ۱۶ تغییرات فاکتور ازدیاد حرارت در تعداد مختلف نوار پیچشی و عدد رینولدز را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود این مشخصه نسبت به ضریب اصطکاک و عدد ناسلت نسبت به تعداد نوار پیچشی هم‌بستگی کمتری دارد. ملاحظه می‌شود که در اعداد رینولدز پایین (کمتر از ۳۰۰۰۰) بیشترین میزان پارامتر ازدیاد حرارت مربوط به حالت ۱ و کمترین آن در حالت به‌کارگیری حالت ۳ حاصل می‌گردد. با افزایش عدد رینولدز تا ۶۰۰۰۰ این پارامتر تقریباً در همه اشکال افزایش می‌یابد.

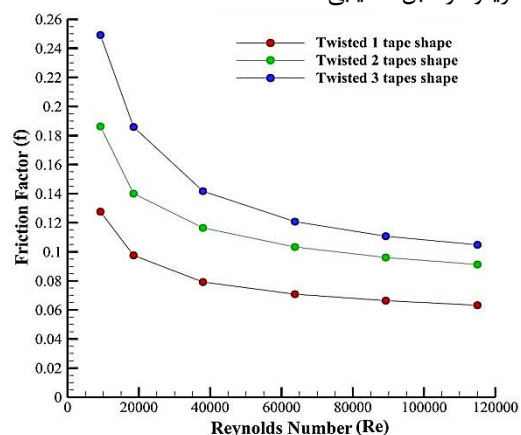


شکل (۱۶): بررسی تأثیر تعداد نوار پیچشی بر فاکتور ازدیاد حرارت یک گیرنده سهموی خورشیدی در اعداد رینولدز مختلف

و سه ضخامت مختلف در شش شرایط رینولدز مختلف جریان موردبررسی قرار گرفته است.

۳-۵- بررسی تأثیر تعداد نوار پیچشی بر مشخصه‌های عملکردی یک گیرنده سهموی خورشیدی در اعداد رینولدز مختلف

شکل ۱۴ تغییرات فاکتور اصطکاک در تعداد مختلف نوار پیچشی و عدد رینولدز را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با تغییر تعداد نوار پیچشی از ۱ به ۳ فاکتور اصطکاک به مقدار قابل‌توجهی (تقریباً ۱۰۰٪) افزایش می‌یابد. ملاحظه می‌شود که در هر تعداد از نوار پیچشی، با افزایش عدد رینولدز، فاکتور اصطکاک کاهش می‌یابد. میزان کاهش فاکتور اصطکاک با افزایش عدد رینولدز، در اعداد رینولدز پایین مشهودتر است. به طوری که برای تک نوار پیچشی، با افزایش عدد رینولدز از ۹۲۰۰ به ۳۸۰۰۰، فاکتور اصطکاک ۳۴٪ و با افزایش عدد رینولدز از ۶۳۰۰۰ به ۱۱۵۰۰۰، حدود ۱۰٪ کاهش می‌یابد. کمترین میزان فاکتور اصطکاک برای یک نوار پیچشی مشاهده می‌شود. در حالت سه نوار پیچشی، وابستگی فاکتور اصطکاک به عدد رینولدز بیشتر است و فاکتور اصطکاک با شیب بیشتری نسبت به افزایش عدد رینولدز کاهش می‌یابد. در اعداد رینولدز پایین وابستگی ضریب اصطکاک به تعداد نوار پیچشی نیز بیشتر است. به طوری که در عدد رینولدز ۹۲۰۰، تغییر تعداد نوار پیچشی از یک به سه سبب افزایش ۹۰٪ فاکتور اصطکاک می‌شود. این در حالی است که در عدد رینولدز ۱۱۵۰۰۰ با تغییر تعداد نوار پیچشی از یک به سه، فاکتور اصطکاک تنها ۵۰٪ رشد می‌کند. نتایج فوق نشان می‌دهد که کمترین فاکتور اصطکاک در حالت تک نوار پیچشی، بیشترین عدد رینولدز قابل‌دستیابی است.

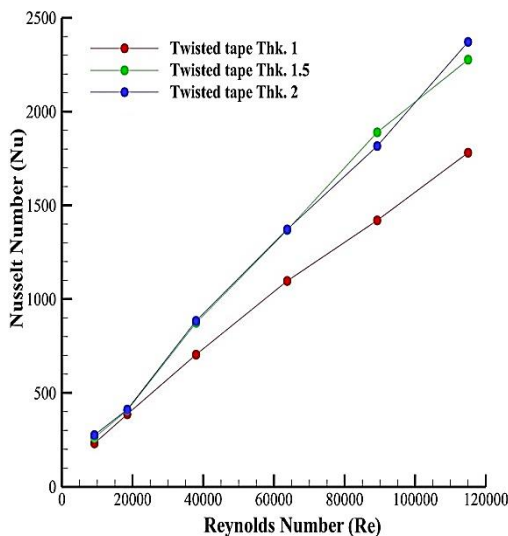


شکل (۱۴): بررسی تأثیر تعداد نوار پیچشی بر ضریب اصطکاک یک گیرنده سهموی خورشیدی در اعداد رینولدز مختلف

شکل ۱۵ تغییرات عدد ناسلت در تعداد مختلف نوار پیچشی و اعداد متفاوت رینولدز را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در هر

با افزایش عدد رینولدز از ۳۸۰۰۰ به ۱۱۵۰۰۰ تنها ۲۲٪ از فاکتور اصطکاک کاسته می‌شود.

شکل ۱۸ تغییرات عدد ناسلت در ضخامت‌های مختلف نوار پیچشی و اعداد متفاوت رینولدز را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که در اعداد رینولدز پایین، تغییر ضخامت تأثیر زیادی بر عدد ناسلت ندارد؛ با این حال با افزایش عدد رینولدز تأثیرگذاری ضخامت نوار پیچشی بر عدد ناسلت قابل توجه خواهد بود. به طوری که در عدد رینولدز ۱۱۵۰۰۰، در حالتی که ضخامت نوار پیچشی از ۱ به ۱/۵ میلی‌متر تغییر می‌یابد، عدد ناسلت به میزان ۲۸٪ رشد می‌کند. تغییر ضخامت نوار پیچشی از ۱/۵ به ۲ میلی‌متر در همه اعداد رینولدز تأثیرگذاری کمی بر عدد ناسلت دارد. افزایش عدد رینولدز هم‌چنین سبب افزایش عدد ناسلت در همه ضخامت‌ها می‌گردد. به طوری که برای ضخامت ۲ با افزایش عدد رینولدز از ۹۲۰۰ به ۱۱۵۰۰۰، عدد ناسلت تقریباً با یک شیب ثابت و به میزان ۸۳٪ (از ۲۴۴/۹ به ۲۲۸۶/۵) افزایش می‌یابد. در اعداد رینولدز بالا نظیر ۱۱۵۰۰۰، عدد ناسلت با افزایش ضخامت نوار پیچشی از ۱ به ۲، به میزان کمی (حدوداً ۱٪) رشد می‌کند.



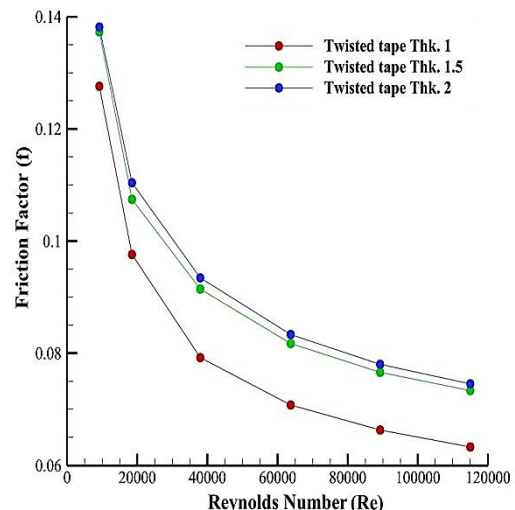
شکل (۱۸): بررسی تأثیر ضخامت نوار پیچشی بر عدد ناسلت یک گیرنده سهموی خورشیدی در اعداد رینولدز مختلف

شکل ۱۹ تغییرات فاکتور ازدیاد حرارت در ضخامت‌های مختلف نوار پیچشی و عدد رینولدز را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود هم‌بستگی کمتری بین ضخامت نوار پیچشی و پارامتر ازدیاد حرارت نسبت به ضریب اصطکاک و عدد ناسلت وجود دارد. با افزایش ضخامت نوار پیچشی از ۱ به ۱/۵ میلی‌متر، پارامتر ازدیاد حرارت به مقدار ۱۷٪ افزایش می‌یابد اما افزایش ضخامت نوار پیچشی از ۱/۵ به ۲ تقریباً تأثیری بر این پارامتر ندارد. ملاحظه

با افزایش بیشتر عدد رینولدز تنها در زمان به‌کارگیری سه نوار پیچشی، پارامتر ازدیاد حرارتی با کاهش روبرو است و در دو حالت دیگر این پارامتر تقریباً افزایش می‌یابد. بیشترین تأثیر عدد رینولدز بر این پارامتر مربوط به کارگیری دو نوار پیچشی است که با افزایش عدد رینولدز از ۹۲۰۰ به ۸۹۰۰۰ با رشد ۷۷٪ روبرو است. نتایج فوق نشان می‌دهد که بیشترین مقدار پارامتر ازدیاد حرارتی در حالت دو نوار پیچشی و در عدد رینولدز ۸۹۰۰۰ قابل‌دستیابی است.

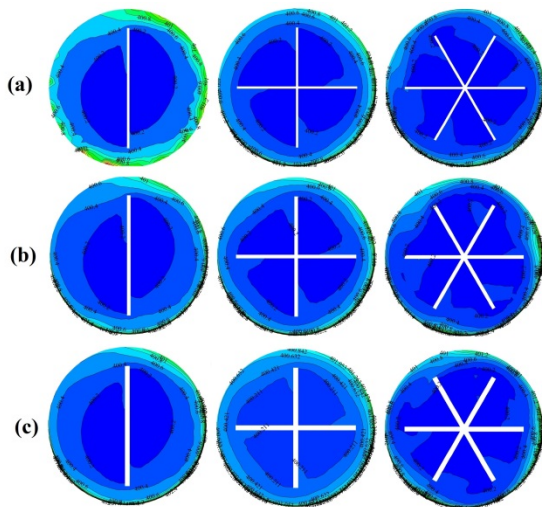
۴-۵- بررسی تأثیر ضخامت نوار پیچشی بر مشخصه‌های عملکردی یک گیرنده سهموی خورشیدی در اعداد رینولدز مختلف

شکل ۱۷ تغییرات فاکتور اصطکاک در ضخامت‌های ۱ mm و ۱.۵ mm نوار پیچشی و عدد رینولدز را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود افزایش ضخامت نوار پیچشی از ۱ به ۱/۵ میلی‌متر سبب افزایش تقریباً بین ۸٪ الی ۱۶٪ در فاکتور اصطکاک می‌گردد. افزایش ضخامت از ۱/۵ به ۲ میلی‌متر تأثیر چندانی بر فاکتور اصطکاک ندارد. با افزایش عدد رینولدز تأثیرگذاری ضخامت نوار پیچشی بر ضریب اصطکاک بیشتر می‌گردد.



شکل (۱۷): بررسی تأثیر ضخامت نوار پیچشی بر ضریب اصطکاک یک گیرنده سهموی خورشیدی در اعداد رینولدز مختلف

افزایش عدد رینولدز باعث کاهش قابل توجه فاکتور اصطکاک در همه ضخامت‌ها نیز می‌شود. به طوری که برای ضخامت ۱/۵ (به‌عنوان مثال) با افزایش عدد رینولدز از ۹۲۰۰ به ۳۸۰۰۰، فاکتور اصطکاک ۳۸٪ کاهش می‌یابد. با افزایش بیشتر عدد رینولدز، شیب کاهش فاکتور اصطکاک کمتر می‌شود. به طوری که



شکل (۲۱): خطوط هم‌تراز دما در خروجی گیرنده سهموی خورشیدی در رینولدز 63000 ؛ الف) ضخامت 1 mm ، ب) ضخامت 2 mm و ج) $1/5\text{ mm}$ ضخامت

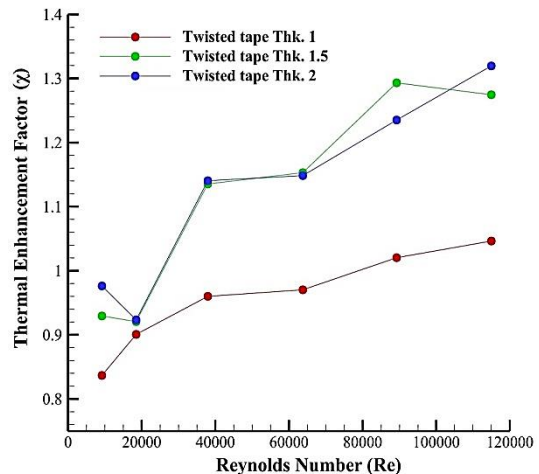
بر اساس شکل ۲۱، با افزایش ضخامت نوار پیچشی و البته تعداد نوار پیچشی از یک‌به‌سه نوار پیچشی، تجمع حرارتی در کنار دیوارها کاسته می‌شود. این موضوع نشان‌دهنده انتقال حرارت بهتر و یکنواخت‌تر درون سیال است که مطابق شکل‌های ۱۵ و ۱۸ با عدد ناسلت بالاتری همراه است.

در انتها می‌توان بیان کرد که استفاده از نوارهای پیچشی در لوله جاذب کلکتور سهموی خورشیدی باعث افزایش قابل توجه انتقال حرارت و بازده حرارتی می‌شود. این بهبود عملکرد منجر به کاهش نیاز به انرژی کمکی، صرفه‌جویی در هزینه‌های عملیاتی و کاهش اندازه یا تعداد کلکتورها برای یک توان مشخص می‌گردد. همچنین با انتخاب مناسب تعداد و ضخامت نوارها، می‌توان افت فشار و هزینه‌های پمپاژ را کنترل کرد که موجب بهینه‌سازی مصرف انرژی سیستم می‌شود. در مجموع، این طرح با کاهش هزینه‌ها، افزایش راندمان و کاهش زمان بازگشت سرمایه، از نظر اقتصادی کاملاً مقرون‌به‌صرفه و توجیه‌پذیر خواهد بود.

۶- نتیجه‌گیری

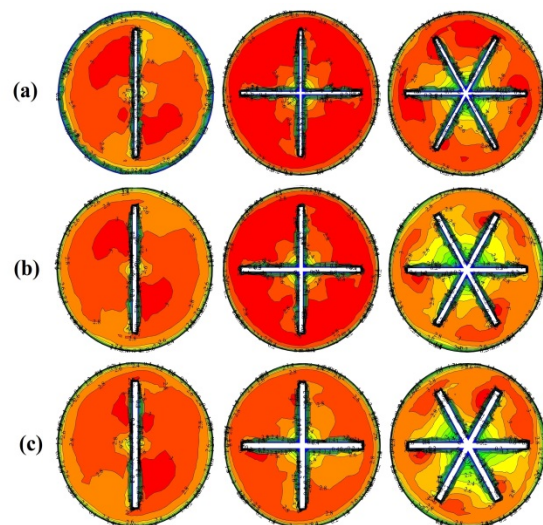
در ابتدا به بررسی تأثیر نسبت پیچش بر عملکرد یک گیرنده سهموی خورشیدی با اتصال نوار پیچشی پرداخته شده است. سپس با نسبت پیچش در محدوده $0.5 = \tilde{\tau}$ و نسبت عرض در محدوده $0.76 = \tilde{W}$ ، تأثیر سه نوع شکل نوار پیچشی مختلف و سه ضخامت مختلف آن در شش شرایط رینولدز مختلف جریان

می‌شود با افزایش عدد رینولدز، پارامتر ازدیاد حرارت در هر سه ضخامت تقریباً همراه با افزایش است. بیشترین تأثیرپذیری پارامتر ازدیاد حرارتی از تغییر عدد رینولدز در بازه 18000 به 38000 و در ضخامت $1/5$ مشاهده می‌شود که با رشد 28% همراه است.



شکل (۱۹): بررسی تأثیر ضخامت نوار پیچشی بر فاکتور ازدیاد حرارت یک گیرنده سهموی خورشیدی در اعداد رینولدز مختلف

در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ به ترتیب خطوط هم‌تراز سرعت و دما در خروجی گیرنده سهموی خورشیدی ارائه شده است. مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت نوار پیچشی و البته تعداد آن از یک‌به‌سه نوار پیچشی، سرعت جریان کمتر شده و مطابق با رابطه (۱۲) و شکل‌های ۱۴ و ۱۷ سبب افزایش فاکتور اصطکاک می‌گردد.



شکل (۲۰): خطوط هم‌تراز سرعت در خروجی گیرنده سهموی خورشیدی در رینولدز 63000 ؛ الف) ضخامت 1 mm ، ب) ضخامت 2 mm و ج) $1/5\text{ mm}$ ضخامت

پیچشی از ۱/۵ به ۲ تقریباً تأثیری بر این پارامتر ندارد. با افزایش عدد رینولدز، پارامتر ازدیاد حرارت در هر سه ضخامت تقریباً همراه با افزایش است.

۷- مراجع

- [1] Price H, Lu^o pfert E, Kearney D, Zarza E, Cohen G, Gee R, et al. Advances in parabolic trough solar power technology. *J Sol Energy Eng.* 2002;124(2):109-25. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.1467922>
- [2] Muñoz J, Abánades A. Analysis of internal helically finned tubes for parabolic trough design by CFD tools. *Applied energy.* 2011;88(11):4139-49. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.026>
- [3] Cheng Z, He Y, Cui F. Numerical study of heat transfer enhancement by unilateral longitudinal vortex generators inside parabolic trough solar receivers. *International journal of heat and mass transfer.* 2012;55(21-22):5631-41. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.05.057>
- [4] Reddy K, Kumar KR, Satyanarayana G. Numerical investigation of energy-efficient receiver for solar parabolic trough concentrator. *Heat Transfer Engineering.* 2008;29(11):961-72. DOI: <https://doi.org/10.1080/01457630802125757>
- [5] Bergles AE. ExHFT for fourth generation heat transfer technology. *Experimental Thermal and Fluid Science.* 2002;26(2-4):335-44. DOI: [https://doi.org/10.1016/S08941777\(02\)00145-0](https://doi.org/10.1016/S08941777(02)00145-0)
- [6] Hasanpour A, Farhadi M, Sedighi K. A review study on twisted tape inserts on turbulent flow heat exchangers: The overall enhancement ratio criteria. *International communications in heat and mass transfer.* 2014;55:53-62. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.04.008>
- [7] Sonawane T, Patil P, Chavhan A, Dusane B. A review on heat transfer enhancement by passive methods. *International Research Journal of Engineering and Technology.* 2016;3(9):1567-74. DOI: <https://www.academia.edu/download/86275260/IRJE-T-V3I9292.pdf>
- [8] Frashad SA, sheikholeslami m. Numerical modeling for thermal performance augmentation of nanofluid in solar flat plate collector equipped with twisted tape. *Journal of Modeling in Engineering.* 2019;17(57):295-313. DOI: 10.22075/jme.2019.15890.1574
- [9] Rios-Irbe EY, Cervantes-Gaxiola ME, Rubio-Castro E, Ponce-Ortega JM, González-Llanes MD, Reyes-Moreno C, et al. Heat transfer analysis of a non-Newtonian fluid flowing through a circular tube with twisted tape inserts. *Applied Thermal Engineering.* 2015;84:225-36. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.03.052>
- [10] Farnam M, Khoshvaght-Aliabadi M, Asadollahzadeh M. Heat transfer intensification of agitated U-tube heat exchanger using twisted-tube and twisted-tape as passive techniques. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification.* 2018;133:137-47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.10.002>

بر عملکرد گیرنده سهموی موردبررسی قرار گرفته است و نتایج زیر حاصل شده است:

- با کاهش ۱۰۰٪ نسبت پیچش (از ۱ به ۰/۵)، ضریب اصطکاک و عدد ناسلت به ترتیب، به طور میانگین ۵۰٪ و ۱۵٪ افزایش می‌یابند. در اعداد رینولدز پایین تأثیر نسبت پیچش بر عدد ناسلت ناچیز است؛ اما در اعداد رینولدز بالاتر از ۱۰۰۰۰ نسبت پیچش بر عدد ناسلت تأثیر گذار است.
- در هر ضخامت و تعداد مشخص از نوار پیچشی، با افزایش عدد رینولدز، فاکتور اصطکاک کاهش و عدد ناسلت افزایش می‌یابد.
- در اعداد رینولدز پایین، تأثیرگذاری تعداد نوار پیچشی بر ضریب اصطکاک و عدد ناسلت به ترتیب زیاد و کم است. به طوری که در عدد رینولدز ۹۲۰۰، تغییر تعداد نوار پیچشی از یک به سه سبب افزایش ۹۰٪ فاکتور اصطکاک می‌شود و در اعداد رینولدز بالای ۸۹۰۰۰، عدد ناسلت با تغییر تعداد نوار پیچشی به میزان تقریبی ۳۵٪ تغییر می‌کند
- کمترین فاکتور اصطکاک در بالاترین عدد رینولدز و حالت تک نوار پیچشی و بیشترین عدد ناسلت در بالاترین عدد رینولدز و در حالت دو نوار پیچشی قابل دستیابی است. بیشترین مقدار پارامتر ازدیاد حرارتی در حالت دو نوار پیچشی و در عدد رینولدز ۸۹۰۰۰ قابل دستیابی است.
- افزایش ضخامت نوار پیچشی از ۱ به ۱/۵ میلی‌متر سبب افزایش تقریبی ۸٪ الی ۱۶٪ در فاکتور اصطکاک می‌گردد. این در حالی است که با افزایش ضخامت از ۱/۵ به ۲ میلی‌متر تأثیر چندانی بر فاکتور اصطکاک مشاهده نمی‌شود. با افزایش عدد رینولدز تأثیرگذاری ضخامت نوار پیچشی بر ضریب اصطکاک بیشتر می‌گردد.
- با افزایش عدد رینولدز تأثیرگذاری ضخامت نوار پیچشی بر عدد ناسلت قابل توجه خواهد بود. به طوری که در عدد رینولدز ۱۱۵۰۰۰، در حالتی که ضخامت نوار پیچشی از ۱ به ۱/۵ میلی‌متر تغییر می‌یابد، عدد ناسلت به میزان ۲۸٪ رشد می‌کند. تغییر ضخامت نوار پیچشی از ۱/۵ به ۲ میلی‌متر در همه اعداد رینولدز تأثیرگذاری کمی بر عدد ناسلت دارد.
- همبستگی کمتری بین ضخامت نوار پیچشی و پارامتر ازدیاد حرارت نسبت به ضریب اصطکاک و عدد ناسلت وجود دارد. با افزایش ضخامت نوار پیچشی از ۱ به ۱/۵ میلی‌متر، پارامتر ازدیاد حرارت به مقدار ۱۷٪ افزایش می‌یابد اما افزایش ضخامت نوار

- [22] Salman SD, Kadhum AAH, Takriff MS, BakarMohamad A. CFD simulation of heat transfer augmentation in constant heat-fluxed tube fitted with baffled twisted tape inserts. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*. 2013;7(8):488-96.
DOI: Microsoft Word - 44B-AJBAS june 2013
- [23] Salman SD, Kadhum AAH, Takriff MS, Mohamad AB. Numerical Investigation of Heat transfer and friction factor characteristics in a circular tube fitted with V-cut twisted tape inserts. *The scientific world journal*. 2013;2013.
DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/492762>
- [24] Salman SD, Kadhum AAH, Takriff MS, Mohamad AB. CFD analysis of heat transfer and friction factor characteristics in a circular tube fitted with quadrant-cut twisted tape inserts. *Mathematical problems in Engineering*. 2013;2013.
DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/273764>
- [25] Al-Shiblawi AI, Heyhat MM. Modifying the Surface of Twisted Tapes With a Hydrophobic Coating to Enhance Their Performance in Parabolic Trough Solar Collector. *International Journal of Energy Research*. 2025;2025(1):7695752.
DOI: <https://doi.org/10.1155/er/7695752>
- [26] Mehta B, Subhedar D, Panchal H, Said Z, Sharma K, Siddiqui MIH, et al. Twisted tape inserts in parabolic trough solar collectors: Assessment of Energy, Exergy, and Environmental impacts. *Applied Thermal Engineering*. 2024;250:123566.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123566>
- [27] Oketola T. Performance Enhancement of a High Concentration Ratio Parabolic Trough Solar Collector using Supercritical CO₂ as the Working Fluid with Modified Twisted Tape Inserts and Rotating Receivers. 2024.
DOI: <https://prism.ualgary.ca/bitstreams/3ab5951c54284d1d8606c94375a22cb2/download>
- [28] Pahlavanian M, Jadidi A, Zaboli M, Saedodin S. Harmonizing green energy: enhancing parabolic trough solar collectors through numerical optimization, twisted tapes, and nanofluids, with an environmental perspective. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2024;149(17):9731-50.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s109730241336-z>
- [29] Dudley VE, Kolb GJ, Mahoney AR, Mancini TR, Matthews CW, Sloan M, et al. Test results: SEGS LS-2 solar collector. Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States); 1994.
DOI: <https://www.osti.gov/servlets/purl/70756>
- [30] SolTrace Optical Modelling Software, SolTrace v2012.7.9.
- [31] Dow, Syltherm800 heat transfer fluid: product technical data. <http://www.dow.com/heattrans/products/synthetic/syltherm.htm> (last accessed 12.06.14).
- [32] Forristall R. Heat transfer analysis and modeling of a parabolic trough solar receiver implemented in engineering equation solver. National Renewable Energy Lab., Golden, CO.(US); 2003.
DOI: <https://www.osti.gov/servlets/purl/15004820>
- [11] Moens L, Blake DM. Mechanism of hydrogen formation in solar parabolic trough receivers. 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4001402>
- [12] Ayub Z, Al-Fahed S. The effect of gap width between horizontal tube and twisted tape on the pressure drop in turbulent water flow. *International journal of heat and fluid flow*. 1993;14(1):64-7.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0142-727X\(93\)90041-K](https://doi.org/10.1016/0142-727X(93)90041-K)
- [13] Saha S, Dutta A, Dhal S. Friction and heat transfer characteristics of laminar swirl flow through a circular tube fitted with regularly spaced twisted-tape elements. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2001;44(22):4211-23.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(01\)00077-1](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00077-1)
- [14] Jaisankar S, Radhakrishnan T, Sheeba K. 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. *Applied Thermal Engineering*. 2009;29(5-6):1224-31.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2008.06.009>
- [15] Eiamsa-Ard S, Wongcharee K, Sripattanapipat S. 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*. 2009;36(9):947-55.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.06.014>
- [16] Bas H, Ozceyhan V. Heat transfer enhancement in a tube with twisted tape inserts placed separately from the tube wall. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2012;41:51-8.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2012.03.008>
- [17] Zhang X, Liu Z, Liu W. Numerical studies on heat transfer and flow characteristics for laminar flow in a tube with multiple regularly spaced twisted tapes. *International Journal of Thermal Sciences*. 2012;58:157-67.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2012.02.025>
- [18] Eiamsa-Ard S, Kiatkittipong K, Jedsadaranachai W. Heat transfer enhancement of TiO₂/water nanofluid in a heat exchanger tube equipped with overlapped dual twisted-tapes. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2015;18(3):336-50.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestech.2015.01.008>
- [19] Eiamsa-Ard S, Promvong P. Performance assessment in a heat exchanger tube with alternate clockwise and counter-clockwise twisted-tape inserts. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2010;53(7-8):1364-72.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.12.023>
- [20] Hong Y, Du J, Wang S. Experimental heat transfer and flow characteristics in a spiral grooved tube with overlapped large/small twin twisted tapes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2017;106:1178-90.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.10.098>
- [21] Saravanan A, Senthilkumaar J, Jaisankar S. Performance assessment in V-trough solar water heater fitted with square and V-cut twisted tape inserts. *Applied Thermal Engineering*. 2016;102:476-86.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.03.088>

[36] Abedinejad MS, Bazdidi-Tehrani F, Sharifi-Sedeh E. Analysis of effects of inlet air and fuel conditions on reactive flow characteristics in a gas turbine model combustion chamber. *Acta Mechanica*. 2024.

DOI:<https://doi.org/10.1007/s00707-024-04023-9>

[37] Patankar S. *Numerical heat transfer and fluid flow*: CRC press; 1980.

[38] Bejan A, Kraus AD. *Heat transfer handbook*: John Wiley & Sons; 2003.

[39] Mwesigye A, Bello-Ochende T, Meyer JP. Heat transfer and entropy generation in a parabolic trough receiver with wall-detached twisted tape inserts. *International Journal of Thermal Sciences*. 2016;99:238-57. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2015.08.015>

[33] Abedinejad MS, Daliri S, Teymoori A. Numerical investigation of the effects of material, wall thickness, one and two zones porosity in a thermo-photovoltaic combustion chamber. *Fluid Mechanics & Aerodynamics*. 2024;13(1).

DOR: 20.1001.1.23223278.1403.13.1.12.8

[34] Mohammadi M, Abedinejad MS. Analysis of NO Formation and Entropy Generation in a Reactive Flow. *Aerospace*. 2022;9(11):666.

DOI:<https://doi.org/10.3390/aerospace9110666>

[35] bazdidi tehrani f, sharifi sade e, Abedinejad MS. Analysis of Influence of Alumina Nanoparticles Addition on Diesel Fuel Droplets Evaporation in A Model Gas Turbine Combustion Chamber. *Fluid Mechanics & Aerodynamics*. 2021;9(2):101-11.

DOR: 20.1001.1.23223278.1399.9.2.8.8