

اثر ایجاد پین‌های استوانه‌ای در بهبود انتقال حرارت جت برخوردی با صفحه تخت: تحلیل عددی

ندا رویایی^{۱*}، امیرحسین هادی پور^۲

۱- استادیار مهندسی مواد، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای

۲- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان

*Email: nroyaei@aeoi.org.ir

چکیده

در این تحقیق، انتقال حرارت جت برخوردی روی دو سطح تخت شامل سطح صاف و سطح مجهز به ردیف پین استوانه‌ای به صورت سه بعدی و عددی بررسی شده است. هوا به عنوان سیال تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شده و شار حرارتی ثابت ۲۰۰۰ وات بر مترمربع بر سطح اعمال گردید. شبیه‌سازی‌ها در دو عدد رینولدز جت (۱۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰) و دو فاصله نسبی نازل از سطح برخورد (H/D) ۱ و ۲ انجام گرفت. نتایج نشان می‌دهد با افزایش عدد رینولدز و کاهش فاصله برخورد، نرخ انتقال حرارت و میانگین عدد ناسلت افزایش می‌یابد. همچنین، در تمامی شرایط سطح دارای ردیف پین عملکرد بهتری نسبت به سطح صاف داشته است. وجود پین‌ها موجب حذف ناحیه سکون سیال و افزایش آشفتگی جریان گردیده و این امر به بهبود چشمگیر انتقال حرارت منجر شده است. نتایج عددی و تجربی کارایی بالای سطح مجهز به پین را در ارتقای انتقال حرارت تأیید می‌کند.

کلمات کلیدی: جت برخوردی، ردیف پین، عدد ناسلت، انتقال حرارت

Effect of Cylindrical Pins on Enhancing Heat Transfer in Impinging Jet on a Flat Plate: Numerical Analysis

Neda Royaei^{1*}, Amir Hosein Hadipour²

1- Assistant Professor, Materials Engineering, Nuclear Science and Technology Institute

2- Master of Mechanical Engineering, Semnan University

*Email: nroyaei@aeoi.org.ir

Abstract

surfaces: a smooth plate and a plate with cylindrical pin arrays. Air was considered as an incompressible fluid, and a constant heat flux of 2000 W/m^2 was applied. Simulations were conducted for two jet Reynolds numbers (10,000 and 15,000) and two jet-to-surface distance ratios ($H/D = 1$ and 2). The results demonstrate that increasing the Reynolds number and reducing the jet-to-plate distance enhance both the heat transfer rate and the average Nusselt number. In all cases, the pinned surface exhibited superior performance compared to the smooth plate. The presence of pins eliminated stagnation zones and promoted flow mixing, leading to a significant improvement in heat transfer. Both numerical and experimental findings confirm the effectiveness of pin arrays in enhancing thermal performance.

Keywords: impinging jet, pin array, Nusselt number, heat transfer

۱- مقدمه

بهینه‌سازی میزان مصرف انرژی در دنیای امروز از اهمیت بالایی برخوردار است. نرخ انتقال حرارت بالا در جت‌های برخوردی توجه بسیاری از محققین را به خود جلب کرده است. در این روش با اعمال مومنتوم قابل توجه به یک سیال خروجی از نازل و سپس با تشکیل یک لایه نازک هیدرودینامیکی و حرارتی بر روی سطح برخورد بهبود قابل توجهی در افزایش میزان انتقال جرم، حرارت و مومنتوم حاصل خواهد شد.

کاربرد مهم و اصلی جت برخوردی، خنک کردن سطح داخلی لبه حمله پره توربین گاز است. در موتورهای توربین گاز، افزایش دمای ورودی به توربین موجب بهبود راندمان حرارتی سامانه می‌شود. در نتیجه این افزایش دما، میزان انتقال حرارت به پره‌های توربین نیز بیشتر خواهد شد. خنک‌کاری با برخورد جت می‌تواند روشی کارآمد برای خنک‌کردن سطح هدف باشد [۱-۳]. امروزه برای کاهش مقاومت لایه مرزی در برابر انتقال حرارت، جرم و مومنتوم از جت‌های برخوردی استفاده می‌شود [۴]. استفاده از چندین جت برخوردی کاربرد گسترده‌تری دارد و نرخ انتقال حرارت بالاتری نسبت به جت منفرد ایجاد می‌کند. یکی از طراحی‌های تقویت‌کننده خنک‌کاری، به‌کارگیری آرایه‌ای از پره‌های میخی (pin-fin) است. این آرایه در معرض جریان سیال خنک‌کننده قرار می‌گیرد. استفاده از این ساختار باعث افزایش انتقال حرارت در مقایسه با سطح صاف به دو دلیل اصلی می‌شود: نخست، پره‌های میخی مساحت سطح هدف را نسبت به سطح صاف افزایش می‌دهند؛ دوم، به دلیل وجود گرادیان فشار معکوس در اطراف هر پره، لایه مرزی از سطح جدا می‌شود [۵،۶].

برخی مطالعات بر ویژگی‌های جریان و انتقال حرارت در اثر برخورد آرایه جت‌ها با صفحه هدف متمرکز شده‌اند [۷]. راثو و همکاران به بررسی افزایش انتقال حرارت ناشی از برخورد چند جت با سطح مجهز به پره‌های میخی پرداختند. آنها مشاهده کردند که پره‌های میخی انتقال حرارت روی سطح هدف را بهبود می‌بخشند و نتیجه گرفتند که عدد ناسلت در ناحیه بین جت‌ها کاهش قابل توجهی دارد [۸]. لو و همکاران ترکیب سطح مجهز به ریزپره‌های میخی و آرایه جت‌های برخوردی را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که نسبت میانگین سطحی عدد ناسلت می‌تواند با افزایش ارتفاع ریزپره‌های مستطیلی بیشتر شود [۹]. سینگ و همکاران تأثیر شکل‌های ریززبر روی سطح هدف را بررسی کردند و مشاهده کردند که سطوح دارای این ریززبری‌ها تا ۲۰-۶۰٪ کارایی بالاتری نسبت به سطح صاف دارند [۱۰]. وان و همکاران انتقال حرارت ناشی از آرایه‌ای از جت‌ها روی سطح هدف مجهز به پره‌های مربعی شکل را برای اعداد رینولدز بالا شبیه‌سازی کردند [۱۱]. شبیه‌سازی عددی آنها بر اساس مدل ارائه‌شده توسط اسپرینگ و همکاران [۱۲] انجام شد. آنها چهار نوع پره میخی (کوچک و بزرگ) را در آرایش‌های خطی و شطرنجی مطالعه کردند. نتایج آنها نشان داد که حداقل مقادیر عدد ناسلت در نواحی بین جت‌ها قرار دارند و هنگامی که از پره‌های کوچک استفاده شود، انتقال حرارت بهبود می‌یابد. همچنین، آرایش خطی پره‌ها در مقایسه با آرایش شطرنجی عملکرد بهتری دارد. هادی‌پور و رجبی جریان و انتقال حرارت جت برخوردی را بررسی کردند و نتایج آنها نشان داد که مدل عددی SST-k- ω با داده‌های تجربی تطابق خوبی دارد [۱۳]. راونجی و رجبی

اثر پره‌های بیضوی بر انتقال حرارت ناشی از جت برخوردی را مطالعه کردند [۱۴]. وارو و همکاران عملکرد ریب‌ها روی صفحات جاذب را به‌صورت تجربی بررسی کردند [۱۵]. یاداف و همکاران یک مطالعه عددی بر بهبود ویژگی‌های انتقال حرارت و معیار ارزیابی عملکرد انتقال حرارت با استفاده از برخورد جت بر روی صفحه جاذب را انجام دادند. این مطالعه تأثیر دو پارامتر هندسی، یعنی نسبت گام جت و نسبت زاویه جت، بر انتقال حرارت، تلفات اصطکاکی را تحت شرایط جریان مختلف اعداد رینولدز از ۳۵۰۰ تا ۱۷۵۰۰ را بررسی کردند [۱۶].

امیر و گولهان مطالعه عددی افزایش انتقال حرارت توسط پین در اثر برخورد جانبی جت را انجام دادند. آنها نشان دادند که نرخ انتقال حرارت موضعی با مقدار عدد پرانتل آشفته تغییر می‌کند [۱۷]. ژی و همکاران عملکرد اصطکاک و انتقال حرارت در پره توربین شامل ساختار پره‌های میخی و حفره‌ها (dimple) را بررسی کردند و نتیجه گرفتند که استفاده از پره‌ها و حفره‌ها می‌تواند میانگین عدد ناسلت صفحه هدف را حدود ۳۱٫۲ تا ۱۲۷٫۳ درصد افزایش دهد [۱۸]. رابین و همکاران انتقال حرارت در ردیفی از جت‌های برخوردی روی سطحی مجهز به ریزپره‌های مکعبی‌شکل را بررسی کردند و مشاهده کردند که این سطوح در مقایسه با سطوح مجهز به پره‌های میخی، تلفات فشار و شار حرارتی را حدود ۱۳۴ تا ۱۴۲ درصد افزایش می‌دهند [۱۹]. در این زمینه لایت و وب مطالعات تجربی خود را بر روی تک جت برخوردی با سطح تخت انجام دادند، آنها فاصله نسبی برخورد را مورد بررسی قرار دادند [۲۰]. آنها نشان دادند که توزیع ناسلت بر روی سطح با فاصله نسبی برخورد رابطه دارد و این رابطه را به این شکل تعریف نمودند: $Nu_0 \sim (\frac{H}{D})^{-0.191}$

شارما و همکاران اثر همزمان جت‌های برخوردی و ریب‌های وی شکل را به صورت عوامل جداگانه منفعل و فعال بر روی هیترهای خورشیدی مورد بررسی و پژوهش عددی و تجربی قرار داده‌اند که نتایج آن‌ها نشان دهنده آن است که موثرترین روش افزایش بازدهی هیترها، وجود ریب‌های مخالف جت برخوردی خواهند بود [۲۱]. سریواستاو و همکاران در تحقیق خود بر تجزیه و تحلیل تجربی و محاسباتی بهبود و افزایش انتقال حرارت جت برخوردی تمرکز کرده‌اند. استفاده از جت‌های لوله غوطه‌ور سرعت برخورد بالایی را ایجاد کرده و باعث ایجاد تلاطم قابل توجهی در صفحه جاذب خواهند شد که منجر به افزایش نرخ انتقال حرارت می‌گردد [۲۲]. تنوس و همکاران در یک تحقیق عددی اثر هفت پارامتر تاثیرگذار روی انتقال حرارت توسط جت برخوردی را بررسی کرده‌اند. نتایج اولیه شبیه‌سازی آن‌ها در نرم‌فراز انسیس فلونت با یک نمونه آزمایشگاهی اعتبار سنجی شده است. یافته‌ها بر نقش حیاتی طول پین‌های صفحه برخورد در افزایش انتقال حرارت و به حداکثر رساندن راندمان حرارتی تأکید می‌کنند [۲۳]. سینگ و ایکاد نیز بر روی پرش هیدرولیکی در جت برخوردی به سطح تخت در فواصل برخورد کم تحقیق کردند، آنها گزارش کردند که برای فواصل نسبی برخورد بسیار کم ($z/d=1$) پرش بیشتر از سایر فواصل نسبی برخورد می‌باشد [۲۴]. گریسون و همکاران [۲۵] نیز توزیع ناسلت در فواصل برخورد کم برای سطح مقعر بدست آوردند. آنها مشاهده کردند برای فواصل نسبی برخورد بسیار کم توزیع ناسلت در تمام سطح بسیار افزایش یافته است. عبدالفتاح و همکاران [۲۶] در مطالعه عددی خود بر روی ساختارهای جریان سیال و انتقال حرارت جت برخوردی دایره‌ای هوا بر صفحه تخت با ردیف دایره‌ای از ۴۸ عنصر زبری (شامل عناصر استوانه‌ای، قطره‌ای

و نیم‌کره‌ای) تمرکز کرده‌اند. آن‌ها با استفاده از مدل توربولانس $k-\epsilon$ ، تأثیر عدد رینولدز (۷۰۰۰ تا ۳۵۰۰۰) و موقعیت عناصر زبری (s/d از ۱٫۵ تا ۳) در فاصله ثابت جت تا صفحه ($H/d=2$) را بررسی کردند. نتایج نشان داد که عناصر زبری نرخ انتقال حرارت را به طور قابل توجهی افزایش می‌دهند؛ به طوری که نسبت متوسط عدد ناسلت برای عناصر استوانه‌ای تا ۱٫۶۱، برای قطره‌ای تا ۲٫۰۲ و برای نیم‌کره‌ای تا ۱٫۲ می‌رسد. یالچینکایا و همکاران اثرات پین‌های شکل اسلات بر عملکرد انتقال حرارت در خنک‌کاری جت برخوردی گسترده را به صورت عددی بررسی کردند [۲۷]. آن‌ها تأثیر ارتفاع پین‌ها (H_p/D_j از ۰٫۱۶۷ تا ۰٫۶۶۷)، آرایش پین‌ها (پراکنده و دایره‌ای)، طول نازل (G_j/D_j از ۱ تا ۶) و عدد رینولدز (۱۶۲۵۰ تا ۳۲۵۰۰) را در کانال مستطیلی مطالعه کردند. یالچینکایا و دورماز در تحلیل عددی خنک‌کاری جت برخوردی با سوراخ‌های نازل کشیده بر روی سطح منحنی زبری‌شده با ریب‌های V شکل، اثرات ابعاد نازل (G/d از ۰٫۵ تا ۸)، ارتفاع ریب (H_r^*/d از ۰ تا ۰٫۴)، زاویه ریب (۳۰ تا ۹۰ درجه) و عدد رینولدز (۵۰۰۰ تا ۲۵۰۰۰) را بررسی کردند [۲۸]. نتایج مطالعه آن‌ها نشان داد که ترکیب جت‌های کشیده با ریب‌ها نرخ انتقال حرارت را تا ۴۷٫۲۳٪ افزایش می‌دهد. مатар و همکاران در مروری بر ویژگی‌های انتقال حرارت جت‌های برخوردی خودکار، دارای عملگر و ترکیبی، روش‌های مختلفی مانند جت‌های حلقوی، چرخشی، مصنوعی و نوسانی را بررسی کردند. آن‌ها با استفاده از شبیه‌سازی، بهبود انتقال حرارت تا ۵۴٫۷٪ در ترکیب جت‌های مصنوعی با دیوذهای سیال، و تا ۳۵٪ در جت‌های نوسانی بر سطوح با پین‌های بیضوی را گزارش کردند [۲۹].

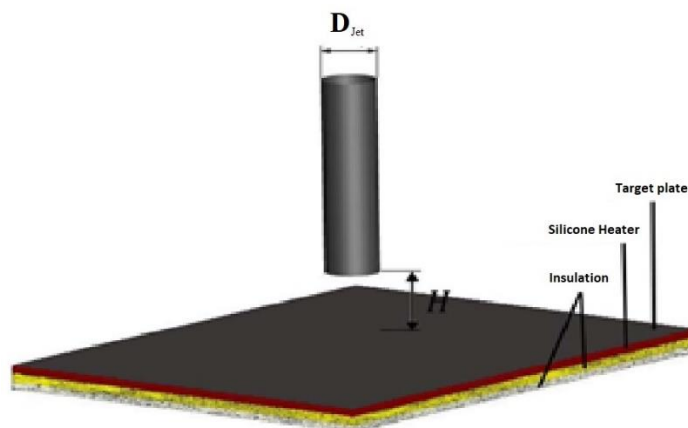
افزایش نرخ انتقال یک از مهمترین هدف‌های محققین در زمینه جت برخوردی می‌باشد اما تحقیقات تجربی و عددی انجام شده در زمینه تک جت و حتی ردیف جت برخوردی، محدود صفحات برخورد صاف بوده و در اکثر مطالعات، به طور مختصر به تأثیر پین در نواحی سکون و سیال مرده بر نرخ انتقال حرارت و توزیع ناسلت پرداخته شده است [۳۱،۳۰]. این در حالی است که در مطالعه حاضر نشان داده خواهد شد که تأثیر وجود یک ردیف پین در نواحی سکون جریان در رینولدزهای متفاوت به مراتب بالا تر از تأثیر تغییر سایر پارامترها از جمله عدد رینولدز و فاصله برخورد است می‌باشد.

لازم به ذکر است که محدوده عدد رینولدز (۱۰۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰) و فاصله بدون‌بعد جت تا سطح (۱ و ۲) با توجه به پارامترهای واقعی موجود در یک پره توربین انتخاب شده‌اند [۳۲].

۲- شبکه محاسباتی و شرایط مرزی و روش حل عددی

هدف مطالعه حاضر، برآورد عدد ناسلت از صفحه مجهز به ردیف پین است. بنابراین، سطح زبرشده با ردیف‌های پین و صفحه تخت که ویژگی‌های آن‌ها قبلاً توضیح داده شد، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. آزمایش‌ها برای دو فاصله جت تا صفحه برابر با ۱ و ۲ انجام شده است. در تمامی حالت‌های این مطالعه، اعداد رینولدز ۱۰۰۰۰ و ۱۵۰۰۰ در نظر گرفته شده‌اند. در شرایط پایا، برای محاسبه عدد رینولدز و ناسلت، میانگین دمای موضعی و سرعت در خروجی نازل اندازه‌گیری شده است. شماتیک اجزای سطح هدف در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که

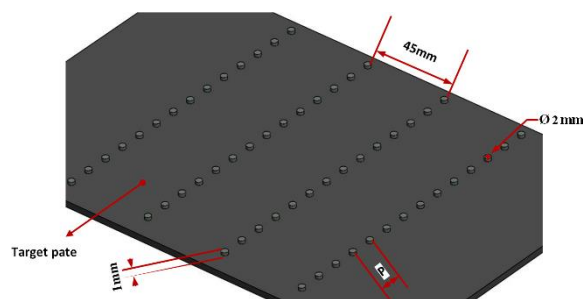
در شکل ۱ مشخص است سطح هدف از پنج بخش تشکیل شده است: دو صفحه فولاد زنگ‌نزن، یک گرم‌کن سیلیکونی و دو لایه عایق (پشم شیشه و پلکسی گلاس). گرم‌کن لاستیکی سیلیکونی با ضخامت ۳ میلی‌متر در زیر سطح هدف قرار گرفته تا شار حرارتی ثابت فراهم کند.



شکل ۱. اجزای سطح برخورد.

Figure 1. Components of the impinging surface.

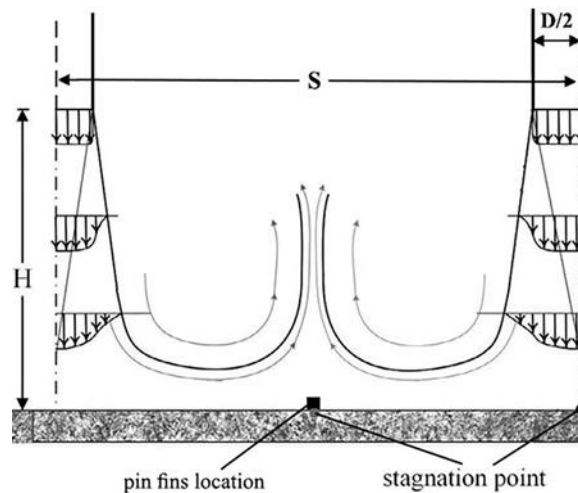
صفحه پین‌دار مورد استفاده دارای ابعاد میلی‌متر بوده و پین‌های استوانه‌ای با قطر ۲ میلی‌متر و ارتفاع ۱ میلی‌متر از جنس فولاد زنگ‌نزن روی آن نصب شده‌اند. این پین‌ها در وسط جت‌ها با فاصله ۱۰ میلی‌متر از یکدیگر قرار گرفته‌اند و قطر هر جت ۱۰ میلی‌متر است (مطابق شکل ۲).



شکل ۲. مشخصات صفحه دارای ردیف پین.

Figure 2. Configuration of the flat plate with pin arrays

یک شماتیک از موقعیت ردیف پین‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۲ دیده می‌شود، در این مطالعه ردیف‌های پره‌ها دقیقاً در وسط دو جت قرار دارند، جایی که جریان خروجی از نازل‌ها به یکدیگر برخورد می‌کند (شکل ۳).



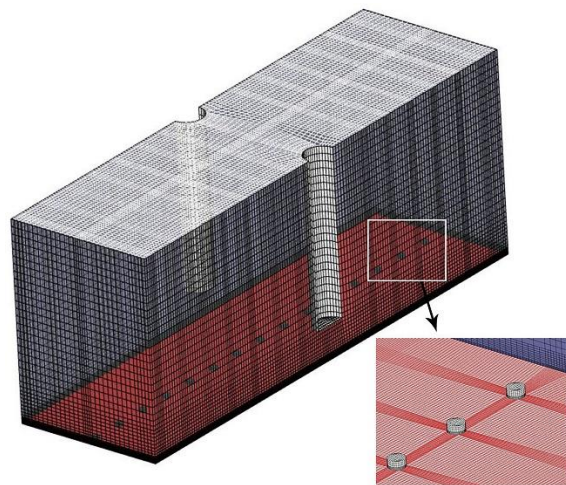
شکل ۳. شماتیک جریان در ناحیه بین جت‌ها
Figure 3. Schematic of the flow in the region between jets

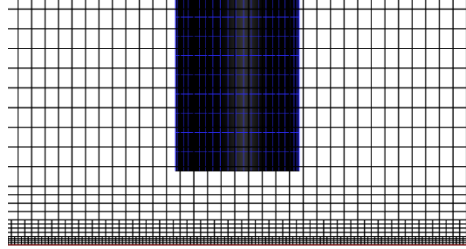
در این پژوهش، برای گسسته‌سازی دامنه حل از یک شبکه سازمان‌یافته با توزیع غیر یکنواخت استفاده گردیده است. نمونه ای از شبکه بندی در شکل ۴ نشان داده شده است.

با توجه به استفاده از مدل‌های رینولدز پایین، به منظور ساده کردن مناسب جریان در ناحیه نزدیک دیواره، سلول‌های شبکه در مجاورت صفحه برخورد ریزتر شده و در مجموع در این تحقیق از ۱،۴۲۱،۸۶۶ سلول محاسباتی استفاده شده است.

جهت گسسته‌سازی معادلات مومنتوم، انرژی و آشفتگی از تقریب بالادست مرتبه دوم بهره گرفته شده است. همچنین ارتباط بین سرعت و فشار از طریق الگوریتم سیمپل سی برقرار شده است.

معیار در نظر گرفته‌شده برای بررسی همگرایی حل، مقدار باقیمانده نسبی معادلات است که برای معادله پیوستگی 10^{-3} و سایر پارامترها 10^{-6} می‌باشد و مقدار y^+ نیز برابر 0.5 می‌باشد.





شکل ۴. شبکه محاسباتی (به منظور حل دقیقتر شبکه محاسباتی در نزدیکی محل برخورد ریز تر شده است)
Figure 4. Computational mesh (refined near the impingement zone for higher accuracy)

۳- طرح مساله و معادلات حاکم

در این آزمایش خنک کاری جت برخوردی دایروی روی صفحه تخت بصورت سه بعدی بررسی شده است. از این رو هندسه های مورد نظر طراحی و شبیه سازی ها در محیط انسیس انجام شده است. به این منظور یک صفحه تخت که تحت شار ثابت گرم می شود در نظر گرفته شده است. همچنین به منظور تحلیل و قطعیت نتایج، این مطالعه به صورت عددی نیز شبیه سازی و مورد مطالعه قرار گرفته است و توزیع عدد ناسلت و سرعت به صورت عددی نیز حاصل شده است.

پس از بررسی مدل های آشفتگی مختلف مدل آشفتگی k-ε RNG به عنوان مدل مناسبی در مساله حاضر در نظر گرفته شده است. تحقیقات انجام شده نشان می دهند که این مدل در پیش بینی پیچیدگی های جریان در برخورد با صفحه تخت دارای دقت بیشتر به همراه سرعت همگرایی بالاتری نسبت به سایر مدل های آشفتگی می باشد [۸،۳۳،۳۴،۳۵،۳۶،۳۷].

روابط حاکم بر مسئله شامل معادلات بقای جرم (پیوستگی)، مومنتوم و انرژی هستند که رفتار جریان و انتقال حرارت را توصیف می کنند:

$$\frac{\partial(\rho \bar{U}_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left(\bar{U}_j \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial (\bar{P} + 2/3 \rho k)}{\partial x_i} + \frac{\partial [(\mu + \mu_t) (\partial \bar{U}_i / \partial x_j + \partial \bar{U}_j / \partial x_i)]}{\partial x_j} \quad (2)$$

$$\rho \left(\bar{U}_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) = \frac{\partial [(k + k_t) \partial \bar{T} / \partial x_j]}{\partial x_j} \quad (3)$$

که در معادلات بالا u مولفه سرعت، p فشار و T دما و K ضریب هدایتی حرارت سیال است. همچنین S_{ij} تانسور نرخ کرنش متوسط که توسط رابطه زیر تعریف می‌شود.

$$S_{ij} = \left[\frac{u_{i,j} + u_{j,i}}{2} \right] \quad (4)$$

همچنین $\overline{u'_i u'_j}$ و $\overline{u'_i T'}$ به ترتیب بیانگر تانسور تنش رینولدز و بردار شار حرارتی ناشی از آشفتگی‌اند که برای بسته‌شدن معادلات، نیازمند مدل‌سازی مناسب می‌باشند. برای معادلات مدل آشفتگی نیز داریم:

معادله k :

$$\rho \left(\frac{\bar{U} \partial k}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial [(\mu + \mu_t / \sigma_k) \partial k / \partial x_i]}{\partial x_i} + G_k - \rho \varepsilon \quad (5)$$

معادله ε :

$$\rho \left(\frac{\bar{U} \partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial [(\mu + \mu_t / \sigma_\varepsilon) \partial \varepsilon / \partial x_i]}{\partial x_i} + C_1 \varepsilon (\varepsilon / k) G_k - C_2 \varepsilon \rho \quad (6)$$

(ε^2 / k)

ویسکوزیته آشفته

$$\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon \quad (7)$$

تولید انرژی جنبشی آشفتگی

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} \right) \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

در روابط فوق، $\bar{U}_i$ ، $\bar{T}$ و $\bar{P}$ به ترتیب سرعت، دما و فشار متوسط زمانی بوده و کلیه معادلات به صورت میانگین‌گیری شده رینولدزی (RANS) نوشته شده‌اند. اثرات آشفتگی با استفاده از مدل k - ε لحاظ شده است.

و ثوابت معادله عبارتند از:

$$C_{1\varepsilon} = 1.42, \quad C_{2\varepsilon} = 1.68, \quad C_\mu = 0.0845$$

$$\sigma_k = \sigma_\varepsilon = 0.7194, \quad \beta = 0.012, \quad \eta_0 = 4.38$$

در معادله بالا k انرژی جنبشی جریان آشفته و ε نرخ اضمحلال ویسکوز انرژی جنبشی آشفته می‌باشد. همچنین لزجت گردابه‌ای و پارامتر بیانگر نسبت زمان مشخصه آشفته‌گی به زمان مشخصه میدان جریان می‌باشد.

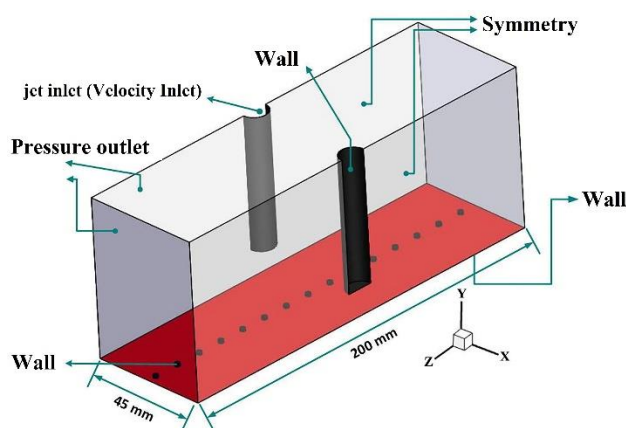
همچنین شرایط آزمایشگاهی برای تمام رینولدزها و فواصل نسبی برخورد در شرایط یکسان شار حرارتی ۲۰۰۰ وات بر متر مربع مورد آزمایش قرار می‌گیرد. در صورتی که شار حرارتی و توزیع دما روی سطح مشخص باشد، می‌توان توزیع عدد ناسلت را با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد:

$$Nu = \frac{q''}{T_s - T_{jet}} \frac{D_{jet}}{k} \quad (9)$$

عدد رینولدز با استفاده از سرعت متوسط سیال در خروجی نازل و قطر نازل و بر اساس رابطه (۱۰) تعیین شده است.

$$Re = \frac{\rho U D_{jet}}{\mu} \quad (10)$$

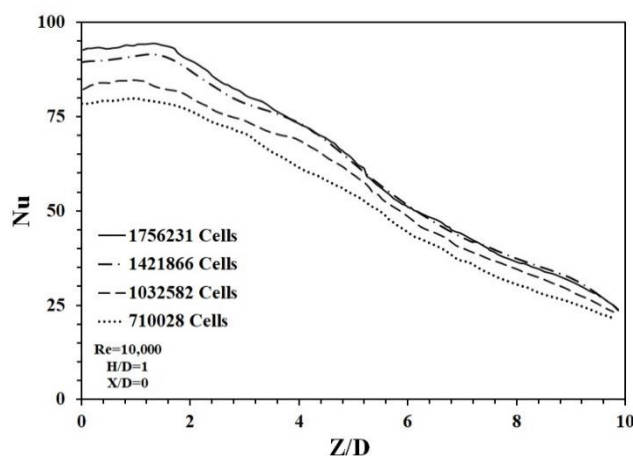
در این پژوهش، سرعت جت به دو شیوه مختلف محاسبه گردیده است. در روش نخست، از لوله پیتوت برای تعیین سرعت استفاده شده؛ به این صورت که فشار کل و فشار استاتیک در چندین مقطع توسط فشارسنج تفاضلی اندازه‌گیری و با محاسبه فشار دینامیکی، سرعت جریان جت استخراج شده است. در روش دوم، سرعت سیال خروجی از لوله مستقیماً به کمک سرعت‌سنج سیم داغ اندازه‌گیری شده است.



شکل ۵. شرایط مرزی حاکم بر مساله

Figure 5. Boundary conditions of the problem

شکل ۶ پروفیل‌های عدد ناسلت برای صفحه مجهز به پره‌های میخی را با در نظر گرفتن چهار شبکه نمونه نشان می‌دهد. مطابق شکل ۶، با ریزتر شدن شبکه از ۱،۴۲۱،۸۶۶ سلول به ۱،۷۵۶،۲۳۱ سلول، تغییر قابل توجهی در مقادیر موضعی عدد ناسلت مشاهده نشد. بنابراین، شبکه با ۱،۴۲۱،۸۶۶ سلول برای ارائه یک حل دقیق و قابل قبول انتخاب شد.



شکل ۶. حل مستقل از مش برای صفحه دارای پین
Figure 6. Grid independence test for the plate with pin arrays

۴- نتایج

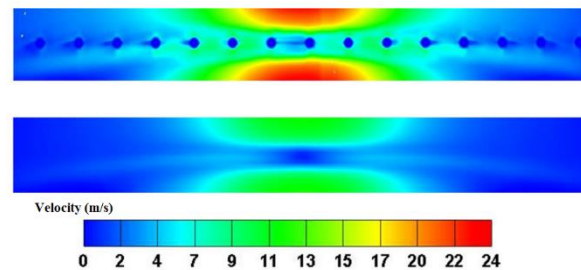
در این تحقیق با تغییر فواصل نسبی برخورد، افزایش رینولدز و اضافه کردن یک ردیف پین بین جت‌ها، توزیع ناسلت و جریان برای حالت‌های مختلف بررسی و با یکدیگر مقایسه شده است.

۴-۱- تاثیر ردیف پین بر توزیع جریان و انرژی جنبشی بین جت‌ها

در این مطالعه با شبیه سازی و تحلیل عددی دو سطح صاف و سطح دارای ردیف پین توزیع جریان در بین دو جت برای هر دو سطح مورد بررسی بدست آمده است. تحقیقات گذشته [۲،۳،۴،۵،۶] نشان می‌دهد که در ناحیه بین دو جت سرعت حرکت سیال بسیار پایین بوده و به همین دلیل انتقال حرارت و ناسلت در این ناحیه به شدت پایین است. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد که با بکار بردن یک ردیف پین استوانه‌ای در بین جت‌ها، ناحیه سیال مرده^۱ که در بین جت‌ها کاملاً از بین رفته و آشفته‌گی بوجود آمده در این ناحیه باعث بالا رفتن انرژی جنبشی آشفته‌گی و انتقال حرارت می‌شود. نتایج حاصل از بررسی توزیع سرعت در بین جت‌ها برای هر دو سطح صاف و پین‌دار در شکل ۷ نشان داده شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که بیشینه سرعت در جهت Z در ناحیه سیال مرده برای سطح صاف و سطح پین‌دار به ترتیب ۷/۵ و ۱۵ متر بر ثانیه است. افزایش سرعت در جهت

^۱ dead fluid zone

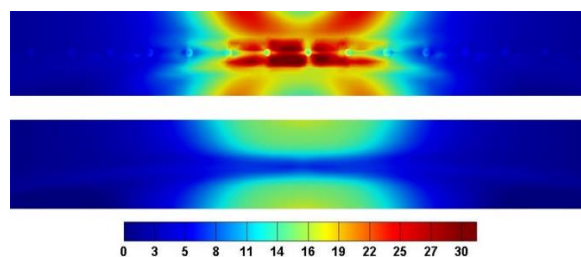
Z می‌تواند به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای ناحیه سیال مرده را برهم بزند و در نتیجه باعث بهبود انتقال حرارت در این ناحیه شود.



شکل ۷. تاثیر ردیف پین بر توزیع جریان در ناحیه بین دو جت
Figure 7. Effect of pin arrays on flow distribution in the region between two jets

شکل ۷ نشان می‌دهد با بکار بردن یک ردیف پین استوانه‌ای مقدار سرعت در بین دو جت بسیار بالا بوده و ناحیه سکون بین دو جت به طور کامل از بین رفته است.

برای درک بهتر تاثیر ردیف پین در بین جتها بر انتقال حرارت و توزیع دما، توزیع انرژی آشفتگی نیز در این ناحیه مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان دهنده آن است که انرژی جنبشی آشفتگی بین دو جت برای سطح تخت صاف بسیار پایین است و یکی از مهمترین دلایل برای پایین بودن انتقال حرارت و ناسلت در این ناحیه نیز همین امر است. اما همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است توزیع انرژی آشفتگی برای سطح پیندار نشان میدهد که با بکار بردن یک ردیف پین استوانه‌ای در بین جت ها نه تنها انرژی جنبشی آشفتگی در این ناحیه کاهش پیدا نمیکند بلکه بالاترین مقدار انرژی جنبشی آشفتگی نیز در این ناحیه است.

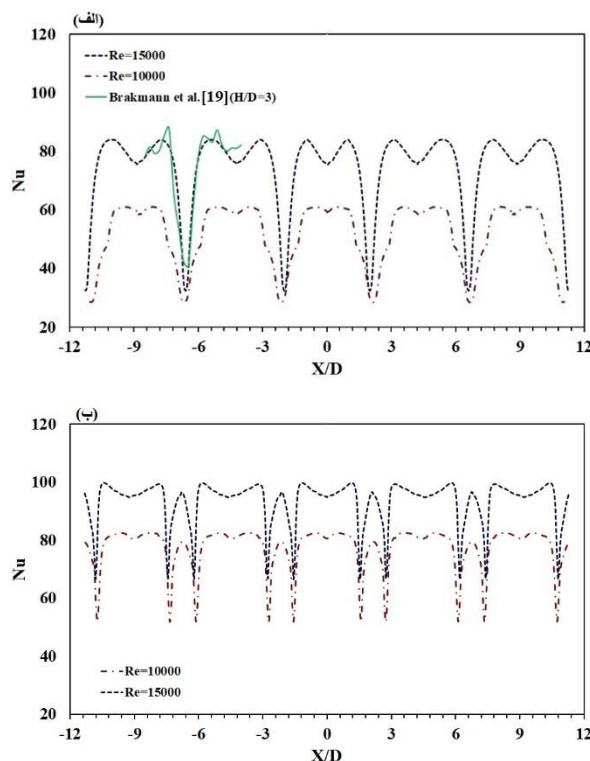


شکل ۸. تاثیر ردیف پین بر توزیع انرژی جنبشی آشفتگی در ناحیه بین دو جت
Figure 8. Effect of pin arrays on turbulent kinetic energy distribution in the region between two jets

۴-۲- تاثیر ردیف پین بین جت‌ها بر توزیع ناسلت

در این قسمت به بررسی تاثیر وجود ردیف پین در بین جت‌ها بر توزیع ناسلت پرداخته شده است. از این رو توزیع ناسلت برای سطح صاف و سطح پیندار به صورت تجربی و عددی بدست آمده است. نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های تجربی و عددی با یکدیگر مقایسه و در شکل ۹ نشان داده شده است.

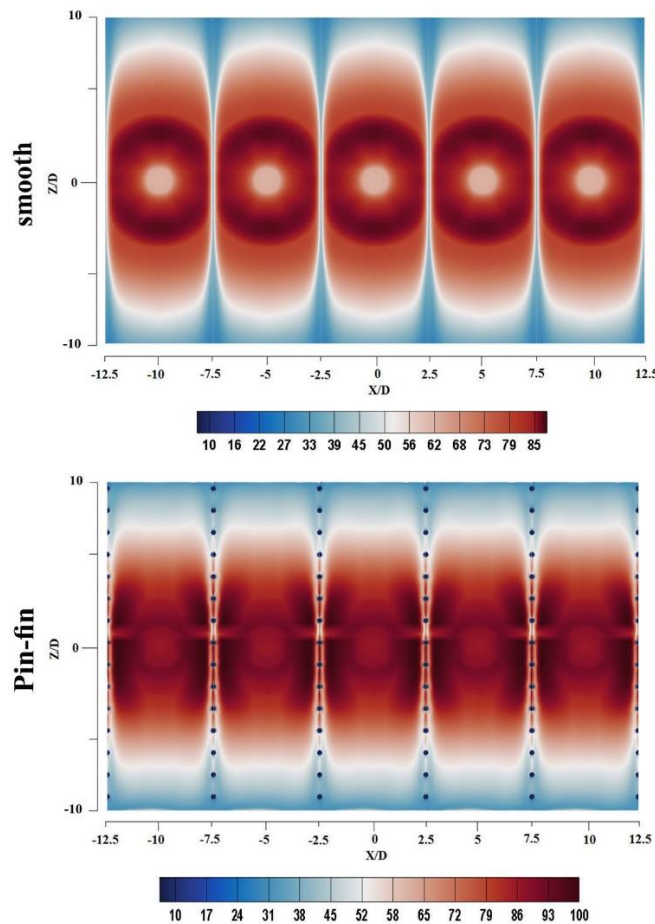
همانطور که در شکل ۹ دیده می‌شود توزیع ناسلت در راستای ردیف جت در جت مرکزی گذرنده از بین جتها رسم شده و نتایج بدست آمده از تحلیل عددی و اندازه‌گیری تجربی با یکدیگر مقایسه شده است.



شکل ۹. مقایسه تجربی و عددی توزیع نسلت در امتداد ردیف در $H/D=2$ (الف) سطح صاف (ب) سطح پین‌دار
Figure 9. Experimental and numerical comparison of Nusselt number distribution along the row at $H/D = 2$: (a) smooth surface, (b) pinned surface

همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود برای سطح پین‌دار مقدار ناسلت در بین جتها در نزدیکی محل قرار گرفتن پین های استوانه‌ای به مقدار قابل توجهی بالا بوده و مقدار ناسلت در بین جتها به طور چشم‌گیری افزایش می‌یابد. اما همانطور که در شکل ۹ (الف) مشاهده می‌شود مقدار ناسلت در بین جتها برای سطح صاف به شدت افت کرده و این بدلیل ناحیه سکون ایجاد شده در این منطقه است. به عبارت دیگر با قرار دادن ردیف پین‌ها ناحیه سیال مرده یا همان ناحیه سکون بین ردیف جتها از بین رفته و باعث آشفتگی جریان در این ناحیه نیز می‌شود که این امر موجب افزایش ناسلت محلی و انتقال حرارت در سطح می‌شود.

برای مشاهده و درک بهتر تاثیر ردیف پین بر ناسلت کانتور کل سطوح در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۰. تاثیر ردیف پین استوانه ای بر توزیع ناسلت سطح تخت در رینولدز ۱۵۰۰۰ و $H/D=2$
Figure 10. Effect of cylindrical pin arrays on the surface Nusselt number distribution at Reynolds number 15,000 and $H/D = 2$

همانطور که گفته شد با استفاده از یک ردیف پین دقیقاً در بین دو جت مقدار سرعت در این ناحیه افزایش پیدا کرده و این امر باعث افزایش شدید انرژی جنبشی آشفتگی و کاهش دما در این ناحیه می‌شود.

۵- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، شبیه‌سازی عددی جریان سیال و پدیده انتقال حرارت یک ردیف جت برخوردی به صفحه تخت با ردیف پین در رینولدز و فواصل برخورد متفاوت صورت گرفته است. در این بررسی از یک جت پایا دایروی برخوردی به سطح تخت که تحت شار حرارتی ثابت 2000 W/m^2 قرار دارد استفاده شده است. بررسی‌ها در دو رینولدز مختلف صورت گرفته و نتایج سطح بدون ردیف پین مقایسه شده است، بررسی نشان می‌دهد که:

۱- با اضافه کردن یک ردیف پین دقیقاً در بین جت‌ها جریان آشسته ایجاد شده و باعث از بین رفتن ناحیه سکون می‌شود. این امر موجب افزایش انتقال حرارت در این ناحیه می‌شود.

۲- افزودن یک ردیف پین در ناحیه بین جت‌ها میانگین ناسلت سطح را بین ۱۵ تا ۵۰ درصد افزایش می‌دهد.

۳- با کم کردن فاصله‌ی نسبی برخورد عدد ناسلت افزایش می‌یابد.

۴- افزایش عدد رینولدز نیز بر افزایش نرخ انتقال حرارت و عدد ناسلت تاثیر بسار زیادی دارد و برای فواصل اما نتایج این مطالعه نشان می‌دهد افزودن یک ردیف پین فقط در بین جت‌ها تاثیر بسیار بیشتری نسبت به عدد رینولدز بر نرخ انتقال حرارت خواهد داشت.

۶- فهرست علائم

D	قطر دهانه خروجی جت
H	فاصله جت از سطح برخورد
K	ضریب هدایت گرمایی هوا،
Nu	عدد ناسلت
q''	شار حرارتی سطح
Re	عدد رینولدز جت
T_{jet}	دمای هوای خروجی از جت
T_s	دمای روی سطوح مقعر
U	سرعت هوای خروجی از نازل
μ	ویسکوزیته دینامیکی
ρ	چگالی

۷- منابع و مراجع

- [1] El-Maghlany, W. M., Sorour, M. M., Abbass, A. M., & Alnakeeb, M. A. (2022). Numerical study of free surface axisymmetric jet impinging on a heated flat surface utilizing high concentration SiO₂ nanofluid. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 135, 104401.
- [2] Ravanji, A., & Zargarabadi, M. R. (2021). Effects of pin-fin shape on cooling performance of a circular jet impinging on a flat surface. *International Journal of Thermal Sciences*, 161, 106684.
- [3] Mehmood, R., Nadeem, S., Saleem, S., & Akbar, N. S. (2017). Flow and heat transfer analysis of Jeffery nano fluid impinging obliquely over a stretched plate. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 74, 49–58.
- [4] El-Bialy, E., & Shalaby, S. M. (2023). Recent developments and cost analysis of different configurations of the solar air heaters. *Solar Energy*, 265, 112091.
- [5] Alam, M. W., Bhattacharyya, S., Souayeh, B., Dey, K., Hammami, F., Rahimi-Gorji, M., & Biswas, R. (2020). CPU heat sink cooling by triangular shape micro-pin-fin: Numerical study. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 112, 104455.

- [6] Rakhsha, S., Zargarabadi, M. R., & Saedodin, S. (2021). Experimental and numerical study of flow and heat transfer from a pulsed jet impinging on a pinned surface. *Experimental Heat Transfer*, 34(4), 376–391.
- [7] Metzger, D. E., Florschuetz, L. W., Takeuchi, D. I., Behee, R. D., & Berry, R. A. (1979). Heat Transfer Characteristics for Inline and Staggered Arrays of Circular Jets With Crossflow of Spent Air. *ASME Journal of Heat Transfer*, 101(3), 526–531.
- [8] Rao, Y., Liu, Y., & Wan, C. (2018). Multiple-jet impingement heat transfer in double-wall cooling structures with pin fins and effusion holes. *International Journal of Thermal Sciences*, 133, 106–119.
- [9] Lu, X., Li, W., Li, X., Ren, J., Jiang, H., & Ligrani, P. (2019). Flow and heat transfer characteristics of micro pin-fins under jet impingement arrays. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 143, 118416.
- [10] Singh, P., Zhang, M., Ahmed, S., Ramakrishnan, K. R., & Ekkad, S. (2019). Effect of micro-roughness shapes on jet impingement heat transfer and fin-effectiveness. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 132, 80–95.
- [11] Wan, C., Rao, Y., & Zhang, X. (2013). *Numerical investigation of impingement heat transfer on a flat and square pin-fin roughened plates* (ASME Paper No. GT2013-94473).
- [12] Spring, S., Yunfei, X., & Bernhard, W. (2012). An experimental and numerical study of heat transfer from arrays of impinging jets with surface ribs. *Journal of Heat Transfer*, 134(8), 082201.
- [13] Hadipour, A., & Rajabi-Zargarabadi, M. (2018). Heat transfer and flow characteristics of impinging jet on a concave surface at small nozzle to surface distances. *Applied Thermal Engineering*, 138, 534–541.
- [14] Ravanji, A., & Zargarabadi, M. R. (2020). Effects of elliptical pin-fins on heat transfer characteristics of a single impinging jet on a concave surface. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 152, 119532.
- [15] Varun, Saini, R. P., & Singal, S. K. (2008). Investigation of thermal performance of solar air heater having roughness element as a combination of inclined and transverse ribs on the absorber plate. *Renewable Energy*, 33(6), 1398–1405.
- [16] Yadav, S., Saini, R. P., & Pandey, K. M. (2023). Effect of jet angle and jet pitch on the Thermo-Hydraulic performance of solar air heater having absorber plate with jet impingement. *Thermal Science and Engineering Progress*, 45, 102146.
- [17] Umair, S. M., & Gulhane, N. P. (2016). On numerical investigation of heat transfer augmentation through pin fin heat sink by laterally impinging air jet. *Procedia Engineering*, 157, 89–97.
- [18] Xie, Y., Shi, D., & Shen, Z. (2017). Experimental and numerical investigation of heat transfer and friction performance for turbine blade tip cap with combined pin-fin-dimple/protrusion structure. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 104, 1120–1134.

- [19] Brakmann, R., Chen, L., Weigand, B., & Crawford, M. (2016). Experimental and numerical heat transfer investigation of an impinging jet array on a target plate roughened by cubic micro pin fins. *Journal of Turbomachinery*, 138(11), 111010.
- [20] Lytle, D., & Webb, B. W. (1994). Air jet impingement heat transfer at low nozzle-plate spacings. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 37, 1687–1697.
- [21] Sharma, A., Thakur, S., Dhiman, P., & Kumar, R. (2024). Effect of jet-impingement and surface roughness on performance of solar air heater: Experimental study and its optimization. *Expert Systems with Applications*, 238, 122208.
- [22] Srivastav, A., Maithani, R., & Sharma, S. (2024). Investigation of heat transfer and friction characteristics of solar air heater through an array of submerged impinging jets. *Renewable Energy*, 227, 120588.
- [23] Tannous, H., Stojceska, V., Tavares, J., & Tassou, S. (2024). Design, numerical optimisation and experimental validation of an innovative solar-powered tube heater with multiple air impingement jets. *Thermal Science and Engineering Progress*, 55, 102990.
- [24] Singh, P., & Ekkad, S. V. (2017). Effects of spent air removal scheme on internal-side heat transfer in an impingement-effusion system at low jet-to-target plate spacing. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108, 998–1010.
- [25] Grenson, P., Léon, O., Reulet, P., & Aupoix, B. (2016). Investigation of an impinging heated jet for a small nozzle-to-plate distance and high Reynolds number: An extensive experimental approach. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 102, 801–815.
- [26] Abdelfattah, M., Aziz, M. A., & Maghrabie, H. M. (2024). Numerical analysis of heat transfer and fluid flow structures of jet impingement on a flat plate with different shapes of roughness elements. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 86(3), 1–25.
- [27] Yalçinkaya, O., Durmaz, U., Tepe, A. Ü., Uysal, Ü., & Özel, M. B. (2022). Effect of slot-shaped pins on heat transfer performance in the extended jet impingement cooling. *International Journal of Thermal Sciences*, 179, 107627.
- [28] Yalçinkaya, O., & Durmaz, U. (2024). Numerical analysis of jet impingement cooling with elongated nozzle holes on a curved surface roughened with V-shaped ribs. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 149(6), 2883–2900.
- [29] Matar, M., Hassan, M. E., Bukharin, N., Sakout, A., Hammoud, A., & Assoum, H. H. (2024). Heat Transfer Characteristics of Passive, Active, and Hybrid Impinging Jets: A Review. *International Journal of Technology*, 15(2), 420–441.
- [30] Jafari Tadi, S., & Nasr Azadani, L. (2025). Application of the Large Eddy Simulation Method in Numerical Study of Turbulent Flows in Stirred Tanks. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 24(139), 148–160. [In Persian].

- [31] Khouzhe Chin, M., Oveisi, S., & Fathi, S. (2020). Application of the Large Eddy Simulation Method in Numerical Study of Turbulent Flows in Stirred Tanks. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 18(107), 46–60. [In Persian].
- [32] Sancar, İ., Bulut, H., & Karadağ, R. (2024). Experimental and numerical analysis of jet impinging solar air collector with hemispherical ribs and circular tapered nozzle. *Proceedings of the 3rd International Conference on Advances in Mechanical Engineering*, 1–10. Adiyaman, Türkiye.
- [33] Reed, R. C. (2006). *The Superalloys: Fundamentals and Applications*. Cambridge University Press.
- [34] Davis, J. R. (2000). *Corrosion: Understanding the Basics*. ASM International.
- [35] Iacovides, H., & Launder, B. E. (2007). Internal blade cooling: the Cinderella of computational and experimental fluid dynamics research in gas turbines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 221(3), 265–290.
- [36] Panahi, I., Parvasi, P., & Javanmardi, J. (2025). Numerical Modeling of the Ultrasonic Waves Effect on Demulsification of Oil-in-Water Emulsion System. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 23(136), 10–21. [In Persian].
- [37] Okati, A., Khani, M. R., & Shokri, B. (2023). Numerical Simulation of Municipal Solid Waste and Biomass Plasma Co-Gasification Process. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 22(128), 110–120. [In Persian].