تاثیر عدد پرانتل بر جریان و انتقال حرارت در جت برخوردی

علی رشنو[1*]، علی ارشادی[2]

[1]. دانشجوی کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

[2]. مربی، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

دریافت: بهار ۹۷ پذیرش: پاییز ۹۷

چکیده

تغییرات در خواص فیزیکی سیال باعث می‌شود که کاربرد مدل‌های مختلف جریان آشفته مورد بحث قرار گیرد. در گذشته تحقیقات بیانگر این نکته بود که عدد پرانتل آشفته بصورت ثابت در کل یک جریان و برابر ۱ و یا نزدیک آن است. اما تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که عدد پرانتل آشفته احتمالا تابعی از متغیرهای حرارتی مایع و همچنین خواص فیزیکی آن است. لازم به ذکر است که تغییر خواص فیزیکی سیال نیز قابل توجه است. از طرفی امروزه توربین‌های گازی نقش مهمی در صنعت ایفا می‌کنند، بنابراین بالا بردن راندمان این توربین‌ها اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند. یکی از راه‌های افزایش راندمان توربین گاز، افزایش دمای گاز در داخل محفظه‌ی احتراق است. این افزایش دما باعث افزایش دمای ورودی توربین می‌شود و در پی آن با توجه به اینکه پره‌های توربین توانایی تحمل دمای بالا را ندارند، از روش‌های خنک‌کاری پره‌های توربین استفاده می‌شود. تا از این طریق طول عمر پره‌های توربین افزایش یابد. در تحقیق حاضر سعی شده تا با بررسی تحقیقات گذشته در زمینه تاثیر عدد پرانتل آشفته بر جریان و انتقال حرارت در جت برخوردی گام مثبتی در زمینه افزایش طول عمر پره‌های توربین برداشته شود. بررسی‌ها نشان داد این نکته که عدد پرانتل آشفته در کل یک جریان بصورت ثابت و برابر ۱ و یا نزدیک آن است، رد می‌شود. با بررسی اعداد مختلف پرانتل آشفته و تاثیر آن بر توزیع ناسلت محلی، مشخص شد که افزایش عدد پرانتل آشفته باعث بهبود کیفیت و دقت نتایج حاصل از ناسلت محلی می‌شود. همچنین با مقایسه‌ی نتایج بدست آمده از روش صریح مرتبه دو و مدل پخش گردابه‌ای ساده، مقدار ۰/۷ بعنوان جایگزین مقدار رایج پیش فرض عدد پراتل آشفتگی (یعنی ۰/۸۵) پیشنهاد می‌شود. زیرا با اعمال عدد پرانتل آشفتگی برابر ۰/۷، پیش‌بینی مناسبی از توزیع دما در خنک‌کاری لایه‌ای در هندسه‌ی مورد بررسی مشاهده شد.

* **عهده‌دار مکاتبات: aliershadi110@gmail.com**

کلمات کلیدی: عدد پرانتل آشفتگی، جت برخوردی، خنک‌کاری، عدد ناسلت، انتقال حرارت

۱- مقدمه

عدد پرانتل آشفتگی کمیتی بی‌بعد بوده که بصورت نسبت اندازه حرکت نفوذ در حالت آشفتگی به انتقال حرارت نفوذ در حالت آشفتگی، تعریف می‌شود. این پارامتر در حل مسائل مربوط به انتقال حرارت در لایه‌های سیال آشفته مناسب است. عدد پرانتل آشفتگی در جریان‌های مهندسی معمولا ثابت و برابر ۰/۸۵ در نظر گرفته می‌شود. فرض ثابت بودن این پارامتر به این معنی است که در شرایط جریانی و هندسی مختلف این نسبت بدون تغییر خواهد بود [۱]. طبق نتایج آزمایشگاهی گذشته، در فشارهای معمولی برای سیالاتی (مانند آب و هوا) که عدد پرانتل آن‌ها برابر یک است، عدد پرانتل در ناحیه‌ی مرکزی به ۰/۷ و در نزدیکی دیواره‌ها تا ۱/۱ نیز می‌رسد [۴-۲]. با توجه به این مسئله بیش‌تر محققان در پژوهش‌های خود عدد پرانتل ثابت ۱ یا ۰/۹ را بکار گرفته‌اند [۵]. چنین داده‌هایی برای جریان خواص متغیر و بویژه سیال فوق بحرانی وجود ندارد. در نتیجه برای چنین شرایطی نیز همانند جریان با خواص ثابت از اعداد پرانتل ثابت فوق استفاده می‌شود [۱۰-۶]. در یک جریان آشفته، اندازه سرعت در هر نقطه دائما تحت نوسانات و تغییرات، هم در اندازه و هم در راستای حرکتی قرار می‌گیرد. بطوریکه تشخیص موقعیت هر ذره در داخل میدان جریان و نیز در هر لحظه مشکل می‌باشد. همین وضعیت نوسانات دائمی و غیر مشخص در اندازه‌ی سرعت را می‌توان در اندازه‌ی فشار، دما و چگالی هر نقطه نیز مشاهده نمود. جریان آشفته یک رودخانه‌ی خروشان و یا جریان‌های متلاطم باد مثال روشنی از دسته‌ی جریان‌های آشفته محسوب می‌شوند، اگر چه ممکن است اندازه‌ی سرعت متوسط در این جریان‌ها پایین باشد. در این جریان، بواسطه‌ی فرایندهای اختلاطی شدید جز در نواحی بسیار نزدیک به دیواره، شکل لایه‌های جریان به راحتی قابل تشخیص نبوده و مولکول‌های سیال مسیر مشخصی را طی نمی‌کنند [۱۱]. از مواردی که باعث تشکیل جریان بصورت آشفته

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.3.4.1]

می‌شود، استفاده از جت برخوردی است. جت‌های برخوردی به علت انتقال حرارت فوق‌العاده بالا بطور گسترده در صنایع استفاده می‌شوند. مهم‌ترین هدف استفاده از جت‌های برخوردی، خنک‌کاری سطوح با شار حرارتی بالا می‌باشد. بطور مثال، ردیف پره‌های ثابت توربین گازی بدلیل برخورد گازهای داغ دارای شار انتقال حرارت بالایی هستند.

از طرفی خنک‌کاری پره‌ها با جت سیال خنک‌کن که از داخل به سطح پره برخورد می‌کند، باعث انتقال حرارت متمرکز روی سطح پره شده و راندمان توربین افزایش می‌یابد. همچنین جت‌های برخوردی در خشک‌کن‌ها، صنایع فولاد و خنک‌کاری قطعات الکترونیک دارای کاربرد فراوان می‌باشند. طبقه‌بندی کلی این جت‌ها شامل جت‌های برخوردی گازی و مایع است که با توجه به تعریف نوع سیال مورد استفاده، متفاوت خواهد بود [۱۲]. یکی از راه‌های افزایش راندمان توربین گاز افزایش دمای گاز در داخل محفظه‌ی احتراق است. این افزایش دما باعث افزایش دمای ورودی توربین می‌شود و در پی آن با توجه به اینکه پره‌های توربین توانایی تحمل دمای بالا (دمایی در حدود ۲۴۰۰ درجه‌ی کلوین) را ندارند، از روش‌های خنک‌کاری پره‌های توربین استفاده می‌شود [۱۳]. تا از این طریق طول عمر پره‌های توربین افزایش یافته و از خوردگی و تخریب آن‌ها جلوگیری شود. با توجه به رابطه‌ی عدد پرانتل آشفته و تاثیر مستقیم این عدد در ضریب انتقال حرارت و به تبع آن انتقال حرارت، استفاده از عدد پرانتل آشفته مناسب و دانش کافی در این زمینه می‌تواند گام مهمی در زمینه‌ی استفاده مناسب از توربین‌ها و محافظت از آن‌ها باشد. زیرا امروزه بخش بزرگی از تامین انرژی در دنیا وابسطه به همین توربین‌ها و جت‌ها می‌باشد. لذا در تحقیق حاضر سعی شده تا با بررسی جامع و مروری پیرامون عدد پرانتل آشفته در جریان حوالی جت‌های برخوردی، بهترین نتیجه در این زمینه گرفته شود. و همچنین گام مثبتی در زمینه محافظت و حفظ استحکام پره‌های توربین‌ها برداشته شود.

۲- انواع روش‌های خنک‌کاری

با توجه به اینکه افزایش دمای ورودی به توربین یک مزیت اجتناب ناپذیر است، اما برای خنک‌کاری پره‌های توربین باید تمهیدات لازم اندیشیده شود. در توربین‌های قدیمی به دلیل پائین بودن دما نیازی به خنک‌سازی وجود نداشت. اما امروزه، استفاده از دماهای بالا موجب بوجود آمدن تنش‌های گرمایی در پره‌های متحرک و کاهش طول عمر پره می‌شود. به طور کلی دمای سطح پره باید در کمتر از ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد باشد تا خوردگی پره از حد مجاز تجاوز نکند.

خنک‌کاری پره با خالی کردن داخل آن و جاری کردن شاره خنک‌کننده از فضای خالی شده امکان‌پذیر می‌باشد. پره توخالی سبک‌تر از پره تو پر بوده و عدد بیو در آن خیلی کوچک‌تر است و از این رو توزیع دما در آن نسبتا یکنواخت می‌باشد. شاره‌های خنک‌کننده هوا و آب می‌باشند. از هوا تا دمای ۱۱۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد، از آب نیز تا دمای ۱۳۱۵ درجه‌ی سانتی‌گراد و از سیستم ترکیبی در بین این دو دما استفاده می‌شود. از آب برای قسمت‌های دما بالا (پره ثابت) و ورودی از هوا، برای بقیه‌ی پره‌ها استفاده می‌شود [۱۴].

۲-۱- انواع خنک‌کاری با هوا

- **خنک‌کاری جابجایی:** این فرم از خنک‌کاری با هدایت جریان هوا به داخل پره توربین و دفع حرارت از طریق دیواره‌ها انجام می‌گیرد. معمولا جریان هوا در جهت شعاعی می‌باشد و از چند مسیر مارپیچ از ته تا نوک پره گذشته و خنک‌کاری صورت می‌گیرد. خنک‌کاری جابجایی در اغلب توربین‌های گاز در حال حاضر مرسوم می‌باشد.
- **خنک‌کاری پاششی**: این نوع خنک‌کاری در واقع همان نوع جابجائی ولی با شدت بسیار بالا می‌باشد که در آن هوا با سرعت بسیار زیاد به صورت فواره به سطح داخلی ایرفویل افشانده می‌گردد و باعث می‌شود که انتقال حرارت زیادی از سطح فلز به هوای خنک‌کن صورت گیرد. این نوع خنک‌کاری همواره در قسمتی از پره صورت می‌گیرد تا اینکه توزیع درجه حرارت را در پره یکسان نماید. مثلا در لبه هدایت پره که درجه حرارت بالا می‌رود از افشاندن هوا استفاده می‌شود و در بقیه قسمت‌های پره نوع جابجائی معمولی می‌باشد.
- **خنک‌کاری لایه‌ای**: این نوع خنک‌کاری براین اساس کار می‌کند که یک لایه عایق هوا بین گاز داغ و پره برقرار می‌گردد و انتقال حرارت را به دیواره پره از طرف گاز داغ کم می‌کند. در واقع به همان روشی اتاق‌های احتراق در مقابل گازهای داغ بوسیله ایجاد لایه عایق هوا حفاظت می‌شود که در لبه پره‌ها نیز همین عمل انجام می‌گیرد. در واقع هوا از داخل سوراخ‌های ریزی از لبه پره عبور می‌کند و به بیرون پره می‌رسد و همین عمل به علت ایجاد فیلم عایق علاوه بر خنک‌کاری، ضریب انتقال حرارت به پره را از سمت گاز داغ کم می‌کند.
- **خنک‌کاری نفوذی**: خنک کردن با این روش احتیاج به این دارد که جریان هوای خنک‌کن از دیواره سوراخ‌دار متخلخل پره عبور نماید و انتقال حرارت مستقیما بین هوای خنک‌کن و گاز داغ وجود دارد. در درجه حرارت‌های بسیار بالا خنک‌کاری تراوشی بسیار موثر خواهد بود زیرا تمام سطح پره را جریان هوای خنک‌کن فرا گرفته است. در این طرح پره به صورت یک پوسته دو جداره توخالی است که توسط سوراخ‌های ریزی که در آن وجود دارد خنک می‌شود. هوا از این سوراخ‌ها عبور کرده و سپس وارد پوسته متخلخل می‌شود و از بیرون پره عبور می‌کند [۱۴].

۲-۲- خنک‌کاری با آب

در این روش آب از داخل لوله‌هایی نازک که در پره تعبیه شده است عبور می‌کند و از نوک پره بصورت بخار بیرون می‌آید. در این صورت به بهترین شکل ممکن خنک‌کاری صورت می‌گیرد. با این روش می‌توان درجه حرارت پره را حتی کم‌تر از ۵۴۰ درجه نگهداشت [۱۴].

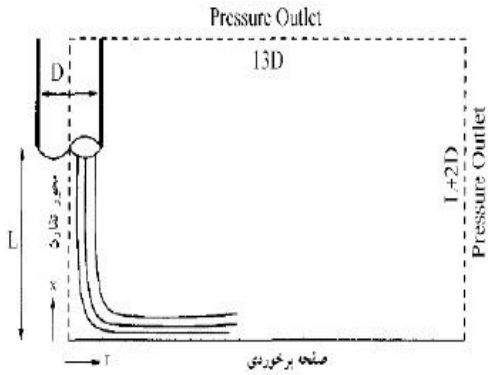
۳- هندسه

انتقال حرارت در یک جت دایروی آشفته که به یک صفحه تخت برخورد می‌کند و شمایی از آن در شکل ۱ دیده می‌شود، در پژوهش‌های بسیاری بصورت تجربی [۱۷-۱۵] مورد بررسی قرار گرفته است. هندسه‌ی قابل مشاهده در شکل ۱ بعنوان هندسه‌ی پایه در تشخیص مدل‌های مختلف آشفتگی، از قبیل مدل‌های k-ε رینولدز پایین [۱۹-۱۸] و مدل-

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

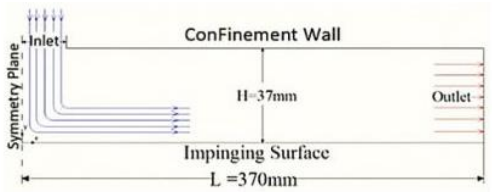
[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.3.4.1]

های k-ε رینولدز بالا [۲۰] استفاده شده است. در ادامه‌ی پژوهش حاضر مدل ارائه شده برای این هندسه که توسط بازدیدی تهرانی و همکاران [۲۱] طراحی شده مورد بررسی و تحلیل قرار خواهد گرفت.

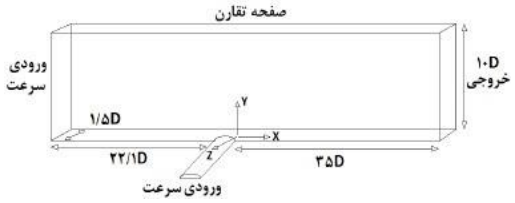


شکل ۱: هندسه جریان دایروی آشفته و شرایط مرزی اعمال شده بر آن [۲۱]

در شکل ۲ نیز یک هندسه دیگر که اولین بار توسط ون‌هاینینگن [۲۲] ارائه شده است، قابل مشاهده می‌باشد. این شکل هندسه‌ی یک شیار جت برخوردی دو بعدی است که با توجه به تقارن فیزیکی و هندسی فقط نیمه‌ی بالای آن برای تحلیل میدان جریان توسط محققان در نظر گرفته می‌شود. همچنین هندسه دیگری که تحقیقات تجربی [۲۳] در زمینه ویژگی‌های جریان آشفته بر روی آن صورت گرفته، در شکل ۳ به نمایش درآمده است. در این هندسه کانال اصلی جریان مکعب مستطیل به ابعاد ۵۸/۱D×۱۰D×۱/۵D است. فاصله مرکز سوراخ در محل تقاطع با دیواره‌ی معبر اصلی جریان، از بالا دست جریان ۲۲/۱ و تا پایین دست جریان ۳۵ برابر اندازه قطر سوراخ تزریق می‌باشد. زاویه تزریق ۳۵ درجه، قطر سوراخ تزریق ۱۱/۱ میلی‌متر و طول سوراخ ۴ برابر اندازه قطر آن می‌باشد. موارد ذکر شده در این بخش چند نمونه از هندسه مورد استفاده در زمینه ویژگی‌های جریان آشفته در اثر برخورد بود، تا بتوان از نتایج تحقیقات گذشته به درک و تحلیل درستی رسید.



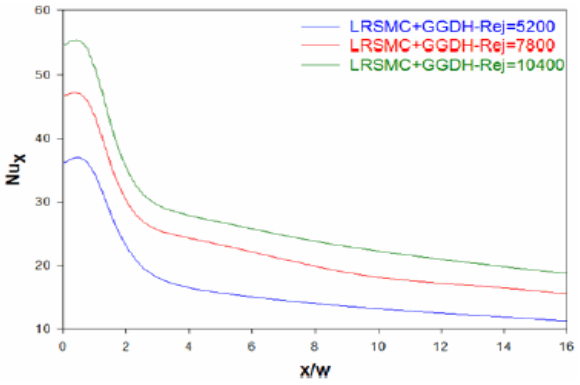
شکل ۲: محدوده‌ی محاسباتی و شرایط مرزی برای جت شیاری [۱]



شکل ۳: هندسه‌ی میدان حل [۲۴]

۴- نتایج و بحث

برای مدت زمان زیادی مقدار عدد پرانتل در سیالات ۱ یا نزدیک به آن مطرح شده است، اما تحقیقات اخیر این نتیجه را رد می‌کند. در ادامه به بیان گزیده‌ای از این نتایج پرداخته خواهد شد. در شکل ۴ تغییرات عدد ناسلت موضعی در جهت جریان را برای سه عدد رینولدز ۵۲۰۰، ۷۸۰۰ و ۱۰۴۰۰ نشان می‌دهد [۱]. مطابق شکل، بیش‌ترین نرخ انتقال حرارت مربوط به ناحیه برخورد (سکون) جت با صفحه بوده و با دور شدن از ناحیه‌ی برخورد، عدد ناسلت بطور محسوسی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد رینولدز، مقدار عدد ناسلت بویژه در ناحیه‌ی برخورد افزایش قابل توجهی دارد که این امر به علت افزایش سرعت برخورد جت با سطح و افزایش دبی سیال خنک می‌باشد. علاوه بر این، نتایج بدست آمده در تحقیق رجبی و محمدپور [۱] نشان می‌دهد که فرض ثابت بودن عدد پرانتل آشفته در انتقال حرارت برخوردی دور از واقعیت بوده و این پارامتر در جت شیاری برخوردی و در محدوده‌ی ۰/۵ تا ۰/۷ تغییر می‌کند. همچنین افزایش عدد رینولدز منجر به افزایش عدد پرانتل آشفته در نواحی نزدیک دیواره می‌شود. اما این پارامتر تاثیر محسوسی بر عدد پرانتل آشفته در فواصل دور از دیوار ندارد.

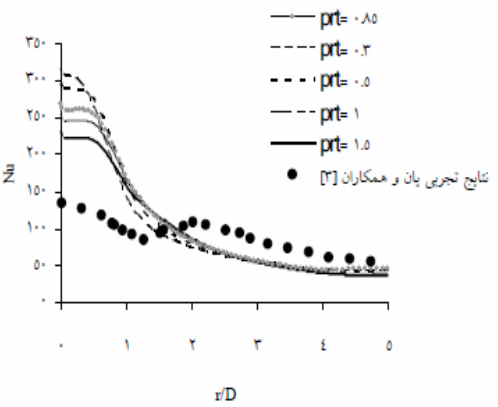


شکل ۴: تاثیر تغییرات عدد رینولدز بر روی توزیع عدد ناسلت موضعی در جهت جریان [۱]

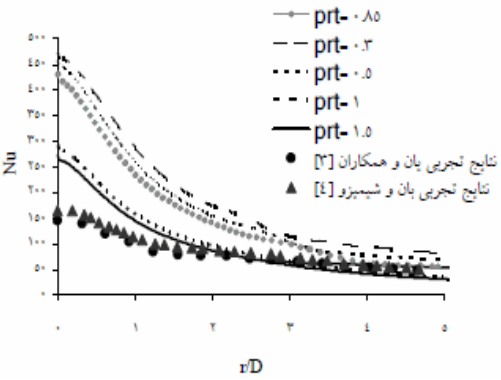
شکل‌های ۵ و ۶، مقایسه‌ی عدد ناسلت محلی بدست آمده توسط مدل آشفتگی رینولدز پایین k-ε و اعمال اعداد پرانتل آشفته مختلف و مقایسه‌ی آن با نتایج تجربی یان و همکاران [۲۵] را نشان می‌دهند [۲۱]. نتایج در دو هندسه‌ی L =۲D و L =۶D و در رینولدز ۲۳۰۰ نشان می‌دهند که افزایش عدد پرانتل آشفته از مقدار از پیش تعیین شده ۰/۸۵ در محاسبات، باعث بهبود تخمین توزیع عدد ناسلت محلی در حوالی نقطه‌ی سکون r/D<۱ می‌شود. شکل ۶ نشان می‌دهد که با افزایش فاصله جت از صفحه برخورد در ناحیه‌ی سکون، افزایش عدد پرانتل در محدوده‌ی ۰/۸۵<Prt<۱ تاثیر قابل توجهی در بهبود پیش‌بینی عدد ناسلت محلی در حوالی نقطه‌ی سکون دارد. این تاثیر بدلیل کاهش تراکم انرژی جنبشی (k) نسبت به حالت L =۲D اتفاق می‌افتد. همچنین مشاهده می‌شود که در L =۶D افزایش عدد پرانتل در نواحی دور از دیواره (r/D>۳)، مطابقت مناسبی با نتایج تجربی از خود نشان می‌دهد.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.3.4.1]

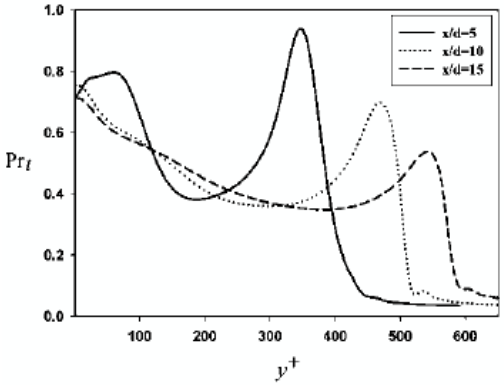


شکل ۵: مقایسه‌ی مدل آشفتگی رینولدز پایین k-ε با اعداد پرانتل آشفته مختلف با نتایج تجربی (L = ۲ D) [۲۱]



شکل ۶: مقایسه‌ی مدل آشفتگی رینولدز پایین k-ε با اعداد پرانتل آشفته‌ی مختلف با نتایج تجربی (L = ۶ D) [۲۱]

در تحقیق بیگلری و همکاران [۲۴]، با استفاده از مدل مرتبه دوم به همراه تصحیح دیواره به مدل‌سازی جریان و انتقال حرارت آشفته در خنک کاری لایه‌ای پرداخته شده است. مقایسه‌ی نتایج تحلیل عددی با مقادیر تجربی نشان می‌دهد که مدل‌های مرتبه دوم جبری - صریح شار حرارتی آشفته، توانایی قابل قبولی در پیش‌بینی پارامترهای موثر در خنک‌کاری لایه‌ای دارند. در ادامه‌ی این تحقیق، تغییرات عدد پرانتل آشفتگی مورد بررسی قرار گرفته و محدوده آن در هندسه مورد نظر، از ۰/۱ در فواصل دور از سوراخ تا حدود ۰/۹۵ در نزدیکی آن، بدست آمده است. همچنین با مقایسه‌ی نتایج بدست آمده از روش صریح مرتبه دو و مدل پخش گردابه‌ای ساده، مقدار ۰/۷ بعنوان جایگزین مقدار رایج پیش فرض عدد پراتل آشفتگی (یعنی ۰/۸۵) پیشنهاد شده است.

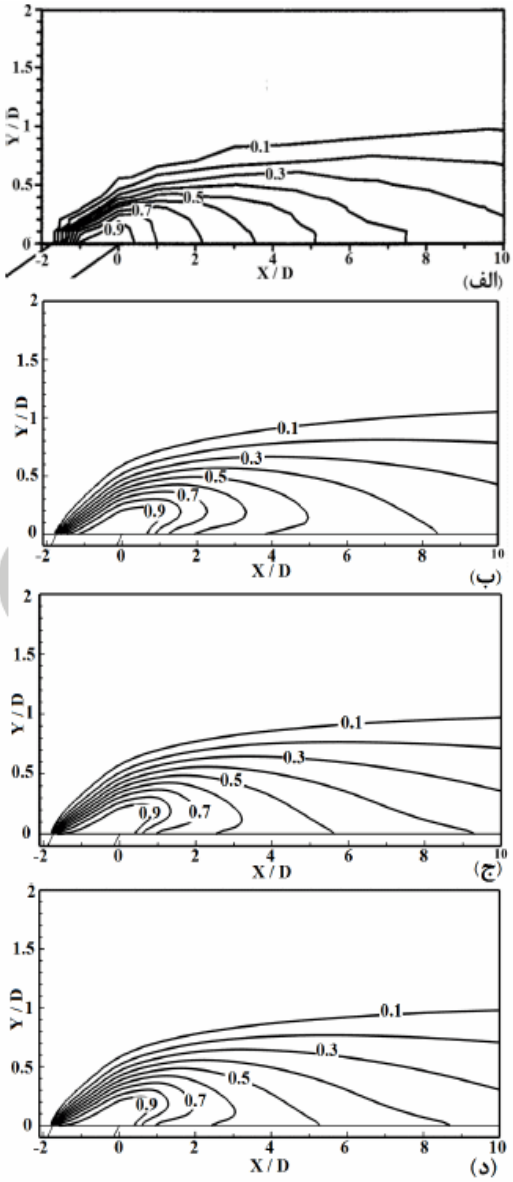


شکل ۷: تغییرات عدد پرانتل آشفتگی بر حسب y^+ [۲۴]

با اعمال عدد پرانتل آشفتگی برابر ۰/۷، پیش‌بینی مناسبی از توزیع دما در خنک‌کاری لایه‌ای در هندسه‌ی مورد بررسی مشاهده می‌شود. تغییرات عدد پرانتل آشفتگی در شکل ۷ بر حسب فاصله بدون بعد از دیواره (y+) در سه منطقه‌ی X= ۵D، ۱۰D و ۱۵D نشان داده شده است [۲۴]. مطابق شکل در تمامی فواصل، عدد پرانتل آشفتگی در نزدیکی دیواره تقریبا برابر ۰/۷ می‌باشد. با افزایش فاصله از سوراخ تزریق، مقدار ماکزیمم عدد پرانتل آشفتگی کاهش یافته و مقدار آن برای X= ۵D، ۱۰D و ۱۵D بترتیب ۰/۹۵، ۰/۷ و ۰/۵۵ می‌باشد. همچنین با توجه به اختلاط جت خنک کننده و جریان اصلی، با افزایش X/D حداکثر عدد پرانتل آشفتگی در فواصل بیش‌تری از دیواره قرار خواهد گرفت.

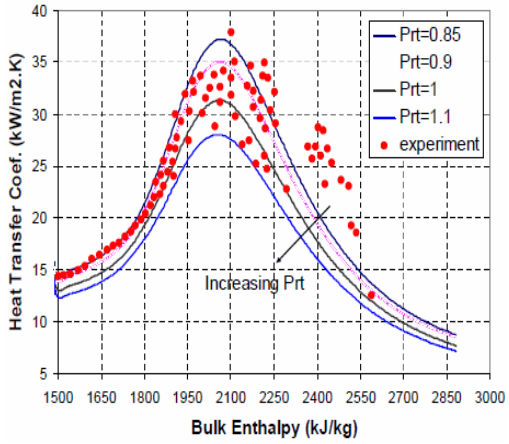
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.3.4.1]

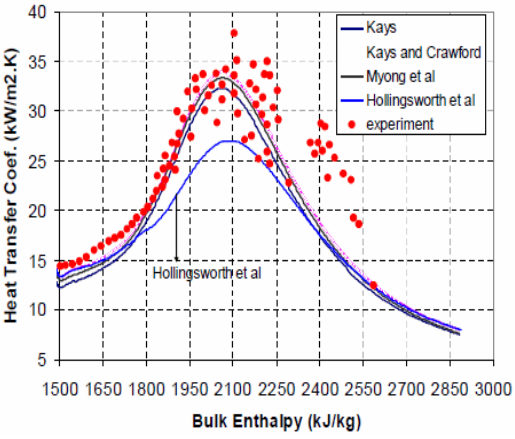


شکل 8: توزیع دمای بی‌بعد، الف) مقدار تجربی ب) پرانتل آشفتگی ۰/۸۵ ج) پرانتل آشفتگی ۰/۷۵ د) پرانتل آشفتگی ۰/۷ [۲۴]

همچنین در این تحقیق مقدار توزیع دمای بی‌بعد در سه عدد پرانتل آشفتگی ۰/۷، ۰/۷۵ و ۰/۸۵ در مقایسه با مقادیر تجربی در شکل ۸ بررسی گردیده است [۲۴]. با توجه به شکل، توزیع دمای بدون بعد با فرض عدد پرانتل آشفتگی برابر ۰/۷ بیش‌ترین مطابقت را با مقادیر تجربی دما داشته است. بنابراین بیگلری و همکاران به این نتیجه رسیدند که مقدار ۰/۷ می‌تواند جایگزین مناسبی برای فرض رایج عدد پرانتل آشفتگی ۰/۸۵ باشد. این مقدار قابلیت پیش‌بینی شرایط نزدیک سوراخ تزریق را داشته و از سوی دیگر پیش‌بینی بهتری از شرایط پایین دست ارائه می‌دهد. تغییرات ضریب انتقال حرارت جابجایی برای اعداد پرانتل مختلف در شکل‌های ۹ و ۱۰ با نتایج تجربی بازارگان و همکارانش [۲۶] مقایسه شده است [۲۷]. بعلت زیاد بودن نمودارها برای مشاهده‌ی بهتر، نتایج حاصل از اعداد پرانتل ثابت و متغیر در دو نمودار مختلف رسم شده‌اند. لازم به ذکر است که در شرایط فوق بحرانی به علت تغییرات خواص، مناسب‌تر است تا به جای دما، آنتالپی حجمی در محور افقی قرار گیرد. در واقع فواصل مساوی از آنتالپی متناظر با فواصل مساوی از طول لوله است در حالی که برای دما این‌گونه نخواهد بود. همانطور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود با افزایش عدد پرانتل ضریب انتقال حرارت کاهش می‌یابد. در واقع با افزایش این عدد ترم دیفیوژن در معادله‌ی انرژی کاهش می‌یابد. بعبارت دیگر با کاهش ترم دیفیوژن در جهت عرضی انتقال حرارت نیز کاهش می‌یابد و این نیز با اصول فیزیکی سازگار است چرا که در این جهت جریانی وجود ندارد و این دیفیوژن است که باعث انتقال حرارت از دیوار به سیال می‌شود. علاوه بر این در جهت طولی به علت کوچک بودن گرادیان آنتالپی یا دما تغییر عدد پرانتل تاثیر چندانی بر انتقال حرارت نخواهد داشت.



شکل ۹: مقایسه‌ی ضریب انتقال حرارت حاصل از نتایج حل عددی برای اعداد پرانتل ثابت با نتایج تجربی بازرگان و همکاران [۲۷]

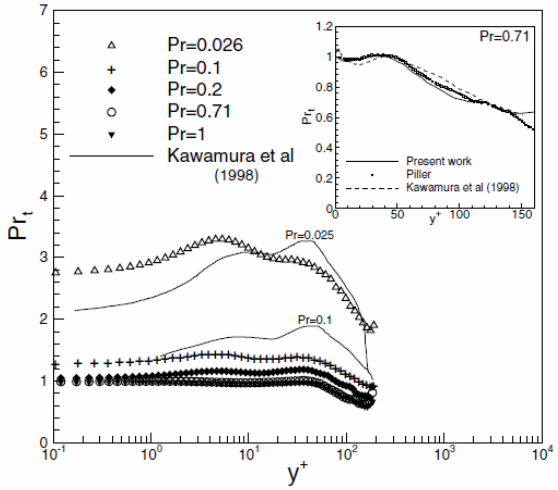


شکل ۱۰: مقایسه‌ی ضریب انتقال حرارت حاصل از نتایج حل عددی برای اعداد پرانتل متغیر با نتایج بازرگان و همکاران [۲۷]

شکل ۱۱ توزیع عدد پرانتل آشفته بر حسب y^+ و در پرانتل‌های مختلف را نشان می‌دهد [۲۸]. همچنین این نتایج با داده‌های تجربی کاوامورا و همکاران [۲۹] مقایسه شده است. مطابق شکل، عدد پرانتل آشفته تقریبا مستقل از عدد پرانتل مولکولی برای $Pr \geq 0.2$ است. توزیع شعاعی ارقام مرتبه‌ی بالاتر رفتار متناوب را در مجاورت دیوار تایید می-

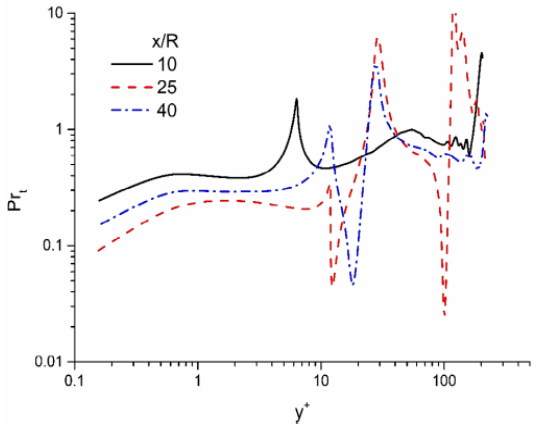
[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.3.4.1]

کند. این رفتار متناوب با افزایش در پرانتل بیش‌تر مشهود است. نتایج بدست آمده با نتایج گذشته در حد قابل قبولی مطابقت دارد. زمانی که عدد پرانتل افزایش یافت محدوده‌ی وزنی نوسانات دما و شار حرارتی آشفته افزایش یافته است. پرانتل آشفته برای پیش‌بینی انتقال حرارت از میدان سرعت شناخته می‌شود. بویژه در منطقه‌ی نزدیک به دیوار که در آن مشخصات پرانتل آشفته وجود دارد. همچنین هنگامی که عدد پرانتل افزایش می‌یابد، نوسانات درجه حرارت و شار حرارتی آشفته نیز افزایش می‌یابد [۲۸].



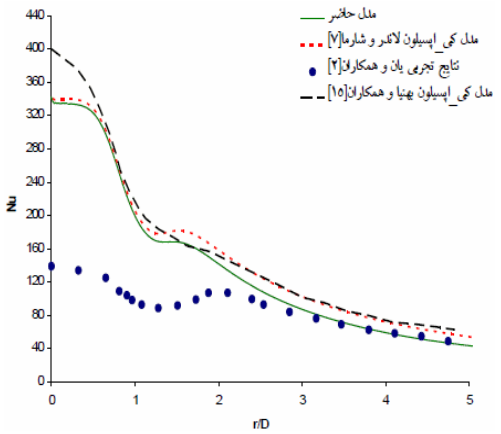
شکل ۱۱: توزیع عدد پرانتل آشفتگی [۲۸]

شکل ۱۲، تغییرات پرانتل آشفته با y+ در سه نمودار محلی را نشان می‌دهد [۳۰]. در ارزیابی صورت گرفته در این شکل ظاهرا در داخل لایه-ی مرزی آشفته بویژه در زیر لایه‌ی چسبنده، پرانتل آشفته مقدار کم‌تری دارد. همچنین مقادیر پرانتل آشفته بطور مداوم به سمت دیوار کاهش می‌یابد.

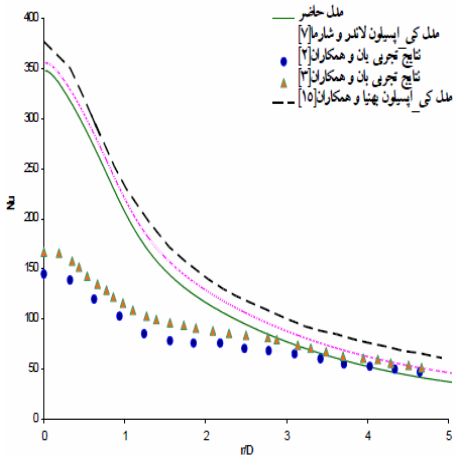


شکل ۱۲: تغییرات Pr_t با y^+ در ناحیه‌های محوری [۳۰]

همچنین ایمانی‌فر و همکاران [۳۱] با تغییر ضریب ثابت عبارت اضمحلال در معادله انرژی جنبشی آشفته و اعمال عدد پرانتل آشفتگی متغیر در معادله انرژی به کمک برنامه نویسی و الحاق آن از طریق توابع تعریف شده به توابع موجود در حل عددی، توانستند نتایج مثبتی در زمینه انتقال حرارت در جت برخوردی بدست بیاورند. بطوریکه در شکل ۱۳ مشاهده می‌شود، عدد ناسلت محلی بدست آمده از مدل حاضر برای L =۲D و رینولدز ۲۳۰۰۰ در مقایسه با داده‌های تجربی [۱۶] و نتایج عددی [۳۳-۳۲] حاصل از مدل k-ε استاندارد، دقت قابل قبول و مناسبی دارد [۳۱]. همچنین از این شکل مشاهده می‌شود که توزیع عدد ناسلت محلی در نقطه‌ی سکون بیشینه است و یک ماکزیمم محلی نیز در r/D~۲ دارد. مقدار بیشینه‌ی عدد ناسلت در نقطه‌ی سکون ناشی از مقادیر بالای انرژی جنبشی آشفتگی (k) در این نقطه است. ماکزیمم محلی دوم بدلیل افزایش آشفتگی حاصل از اختلاط لایه‌ها پدید می‌آید. این نکته به خوبی در کانتورهای انرژی جنبشی آشفتگی در حالت L =۲D و رینولدز ۲۳۰۰۰ قابل مشاهده است. در شکل ۱۴ عدد ناسلت محلی محاسبه شده توسط ایمانی‌فر و همکاران [۳۱] برای L =۶D، با داده‌های تجربی [۳۴و۱۶] و حل عددی [۳۳-۳۲] حاصل از مدل k-ε استاندارد و مدل لاندر و شارما مقایسه شده است. بر خلاف نتایج حاصل از نسبت L =۲D مقدار ماکزیمم ثانویه عدد ناسلت در نسبت L =۶D دیده نمی‌شود. این مطلب از این واقعیت نشئت می‌گیرد که افزایش فاصله میان جت وسط تخت برخوردی محل ماکزیمم مقدار انرژی جنبشی (k) را به محور جت نزدیک‌تر می‌کند.



شکل ۱۳: مقایسه‌ی بین عدد ناسلت محلی بدست آمده از مدل حاضر با سایر نتایج عددی و تجربی (L = ۲ D) [۳۱]



شکل ۱۴: مقایسه‌ی بین عدد ناسلت محلی بدست آمده از مدل حاضر با سایر نتایج عددی و تجربی (L = ۶ D) [۳۱]

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.3.4.1]

۵- نتیجه‌گیری

در گذشته تحقیقات بیانگر این نکته بود که عدد پرانتل آشفته بصورت ثابت در کل یک جریان و برابر ۱ و یا نزدیک آن است. اما تحقیقات اخیر این موضوع را رد می‌کند. با بررسی اعداد مختلف پرانتل آشفته و تاثیر آن بر توزیع ناسلت محلی، مشخص شد که افزایش عدد پرانتل آشفته باعث بهبود کیفیت و دقت نتایج حاصل از ناسلت محلی می‌شود. در ادامه، تغییرات عدد پرانتل آشفتگی مورد بررسی قرار گرفته و محدوده آن در هندسه مورد نظر، از ۰/۱ در فواصل دور از سوراخ تا حدود ۰/۹۵ در نزدیکی آن، بدست آمده است. همچنین با مقایسه‌ی نتایج بدست آمده از روش صریح مرتبه دو و مدل پخش گردابه‌ای ساده، مقدار ۰/۷ بعنوان جایگزین مقدار رایج پیش فرض عدد پراتل آشفتگی (یعنی ۰/۸۵) پیشنهاد شده است. با اعمال عدد پرانتل آشفتگی برابر ۰/۷، پیش-بینی مناسبی از توزیع دما در خنک‌کاری لایه‌ای در هندسه‌ی مورد بررسی مشاهده شد. تغییرات عدد پرانتل آشفتگی بر حسب فاصله بدون بعد از دیواره (y+) در سه منطقه‌ی X =۵D، ۱۰D و ۱۵D نشان داد که در تمامی فواصل، عدد پرانتل آشفتگی در نزدیکی دیواره تقریبا برابر ۰/۷ می‌باشد. با افزایش فاصله از سوراخ تزریق، مقدار ماکزیمم عدد پرانتل آشفتگی کاهش یافته و مقدار آن برای X =۵D، ۱۰D و ۱۵D بترتیب ۰/۹۵، ۰/۷ و ۰/۵۵ می‌باشد. همچنین با توجه به اختلاط جت خنک کننده و جریان اصلی، با افزایش X/D حداکثر عدد پرانتل آشفتگی در فواصل بیش‌تری از دیواره قرار خواهد گرفت. همچنین در شرایط فوق بحرانی با افزایش عدد پرانتل ضریب انتقال حرارت کاهش یافت. در واقع با افزایش این عدد ترم دیفیوژن در معادله‌ی انرژی کاهش می‌یابد. بعبارت دیگر با کاهش ترم دیفیوژن در جهت عرضی انتقال حرارت نیز کاهش می‌یابد و این نیز با اصول فیزیکی سازگار است چرا که در این جهت جریانی وجود ندارد و این دیفیوژن است که باعث انتقال حرارت از دیوار به سیال می‌شود. علاوه بر این در جهت طولی به علت کوچک بودن گرادیان آنتالپی یا دما تغییر عدد پرانتل تاثیر چندانی بر انتقال حرارت نخواهد داشت. توزیع عدد پرانتل آشفته بر حسب y+ و در پرانتل‌های مختلف نشان داد که عدد پرانتل آشفته تقریبا مستقل از عدد پرانتل مولکولی برای Pr ≥۰/۲ است. زمانی که عدد پرانتل افزایش یافت، محدوده‌ی وزنی نوسانات دما و شار حرارتی آشفته افزایش یافته است. پرانتل آشفته برای پیش‌بینی انتقال حرارت از میدان سرعت شناخته می‌شود. بویژه در منطقه‌ی نزدیک به دیوار که در آن مشخصات پرانتل آشفته وجود دارد. همچنین هنگامی که عدد پرانتل افزایش یافت، نوسانات درجه حرارت و شار حرارتی آشفته نیز با افزایش رو به رو بود. در ادامه با استفاده از عدد پرانتل آشفته متغیر مشخص شد که نتایج مربوط به عدد ناسلت و به تبع آن انتقال حرارت دارای دقت و کیفیت بالاتری می‌شوند.

مراجع

[1] J., Mohamadpoor, M., Rajabi Zargarabadi, Prediction of the range of the turbulent Prandtl number in the collisional jet With the combination of low-order Reynolds second-order models, Scientific Journal of Structurals and Fluids Mechanic, 3 (2012) 181-190.

[2] R. A., Antonia, J., Kim, Turbulent Prandtl number in the near-wall region of a turbulent channel flow, Int. J. Heat and Mass Transfer, (1991).

[3] D. M., McEligot, M. F., Taylor, The turbulent Prandtl number in the near-wall region for low-Prandtlnumber gas mixtures, Int. J. Heat and Mass Transfer, (1996).

[4] W.M., Kays, M.E., Crawford, Convective heat and mass transfer, 4th ed.,McGraw-Hill, (2005).

[5] M., Behnia, S., Parneix, P.A., Durbin, Prediction of heat transfer in an axisymmetric turbulent jet impinging on a flat plate, Int. J. Heat Mass Transfer, 41 (1998) 1845–1855.

[6] S., Koshizuka, N., Takano, Y., Oka, Numerical analysis of deterioration phenomena in heat transfer to supercritical water, Int. J. Heat Mass Transfer, No.16, 38 (1995) 3077-3084.

[7] S.H., Lee, Convective heat transfer to water near the critical region in a horizontal square duct, Int. Heat Mass Transfer, 51 (2008) 2930-2939.

[8] M., Sharabi, W., Ambrosini, S., He, J.D., Jackson, Prediction of turbulent convective heat transfer to a fluid at supercritical pressure in square and triangular channels, Annals of Nuclear Energy, 35 (2008) 993-1005.

[9] P.-X.,Jiang, et al., Experimental and numerical investigation of convection heat transfer of CO2 at supercritical pressures in a vertical mini-tube, International Journal of Heat Mass Transfer , 51(2008) 3052-3056.

[10] S., He, W.S., Kim, J.D., Jackson, A computational study of convective heat transfer to carbon dioxide at a pressure just above the critical value, Applied Thermal Engineering, 28 (2008) 1662-1675.

[11] M., Sanieinejad, An Introduction to the Context of Turbulent Currents and Modeling, Third Edition, (2004).

[12] S., Tayebi, Numerical solution of heat transfer caused by impact jet on flat plate, «M.Sc» Thesis Aerospace, Department Mechnic of Islamic Azad University Dezfoul Branch (2014).

[13] J., Han, S., Dutta, S., Ekkad, Gas Turbine Heat Transfer And Cooling Technology, Taylor & Francis, New York, (2000).

[14] A., Peivandi, M., koochaki, Investigating the Types of Gas Turbine Blades Cooling Techniques, Wikipower .ir (2003).

[15] D., Cooper, D., Jackson, B., Launder, G., Liao, Impinging jet studies for turbulence model assessment I. Flow-field experiments, Int. J. Heat & Mass Transfer, 36 (1993) 2675-2684.

[16] X., Yan, J. W., Baughn, M., Mesbah, The effect of Reynolds number on the heat transfer distribution from a flat plate to an impinging jet, ASME HTD, 226 (1992) 1-7.

[17] J., Baughn, S., Shimizu, Heat transfer measurements from a surface with uniform heat flux and an impinging jet, Int. J. Heat & Mass Transfer, 111 (1989) 1096-1098.

[18] T. S., Park, H. J., Sung, Development of a near-wall turbulence model and application to jet impingement heat transfer, Int. J. Heat & Fluid Flow, 22 (2001) 10-18.

[19] T. J., Craft, L. J. W., Graham, B. E., Launder, Impinging jet studies for turbulence model

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.3.4.1]

assessment II. An examination of four turbulence models, Int. J. Heat & Mass Transfer, 36 (1993) 2685-2697.
[20] T. J., Craft, S. E., Gant, H., Iacovides, B. E., Launder, A new wall function strategy for complex turbulent flows, Numerical Heat Transfer, 45 (2004) 301-318.
[21] F., Bazdidi-Tehrani, A., Imanifar, H., Foroutan, M., Rajabi-Zargarabadi, Effect of Variation of Turbulent Prandtl Number to Flow and Heat Transfer Analysis in a Circular Impinging Jet, Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, (2009).
[22] A. R. P., Van Heiningen, Heat transfer under an impinging slot jet, Ph.D. Thesis, Department of Chemical Engineering, McGill University, Montreal, Quebec, Canada, (1982).
[23] A., Kohli, D. G., Bogard, Turbulent Transport in Film Cooling Flows, Heat Transfer, 127 (2005) 513-520.
[24] H., Naderi Mahabadi, M., Rajabi Zargarabadi, M., Biglari, On predicting the turbulent prandtl number in film cooling flow, Scientific Journal of Mechanical Engineering Modares, 12 (2012) 69-79.
[25] X., Yan, J. W., Baughn, M., Mesbah, The effect of Reynolds number on the heat transfer distribution from a flat plate to an impinging jet, ASME LTD, 226 (1992) 1-7.
[26] M., Bazargan, D., Fraser, V., Chatoorgan, Effect of buoyancy on heat transfer in supercritical water flow in a horizontal round tube, Journal of Heat Transfer, Vol. 127 (2005) 897-902.
[27] M., Bazargan, M., Mohseni, Effect of the turbulent prandtl number on the heat transfer of the turbulent flow of variable properties by numerical method, Twelfth fluids Dynamic Conference, Noushirovani University of Technology, Babol (2010).
[28] L., Redjem-Saad, M., Ould-Rouiss, G., Lauriat, Direct numerical simulation of turbulent heat transfer in pipe flows: Effect of Prandtl number, International Journal of Heat and Fluid Flow, 28 (2007) 847–861.
[29] H., Kawamura, K., Ohsaka, H., Abe, K., Yamamoto, DNS of turbulent heat transfer in channel flow with low to medium-high Prandtl number fluid. Int. J. Heat Fluid Flow, 19 (1998) 482–491.
[30] J. H., Bae, J. H., Yoo, H., Choi, Direct numerical simulation of turbulent supercritical flows with heat transfer, Phys. Fluids, 17 (2005) 105104.
[31] F., Bazdidi-Tehrani, A., Imanifar, H., Foroutan, M., Rajabi-Zargarabadi, Effect of Variation of Turbulent Prandtl Number to Flow and Heat Transfer Analysis in a Circular Impinging Jet, Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, (2009).
[32] B. E., Launder, B. I., Sharma, Application of the energy dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc, Letters in Heat and Mass Transfer, 1(1974) 131-138.
[33] M., Behnia, S., Parneix, P. A., Durbin, Prediction of heat transfer in an axisymmetric turbulent jet impinging on a flat plate, Int. J. Heat & Mass Transfer, 41 (1998) 1845-1855.
[34] J., Baughn, S., Shimizu, Heat transfer measurements from a surface with uniform heat flux and an impinging jet, Int. J. Heat & Mass Transfer, 111 (1989) 1096-1098.

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.3.4.1]