تاثیر عدد پرانتل آشفته بر مدل‌سازی شار حرارتی آشفته در جریان انتقال حرارت جت شیاری

علی رشنو[۱]، علی ارشادی[۲]*

[۱]دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران
[۲]مربی، گروه مهندسی مکانیک، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران

دریافت: بهار ۹۷ پذیرش: زمستان ۹۷

چکیده

با توجه به تغییر در خواص فیزیکی سیال در شرایط مختلف، ضرورت بررسی مدل‌های مختلف جریان آشفته در حالت‌ها و ویژگی‌های مختلف به میزان زیادی احساس می‌شود. از این رو در پژوهش حاضر به بررسی تاثیر تغییرات عدد پرانتل آشفته در جریان انتقال حرارت جت شیاری برخوردی پرداخته شده است. برای مدل‌سازی جریان آشفته با استفاده از کد تجاری فلوئنت ۶/۳، مدل آشفتگی k-ε استاندارد استفاده شد. پس از آن با بررسی استقلال حل از شبکه، بهترین شبکه-بندی یعنی ۴۰۰*۷۵ برای مدل‌سازی و بررسی مسئله انتخاب و استفاده شد. در ادامه اثر عواملی مانند تغییر عدد پرانتل آشفته و عدد رینولدز جریان جت و استفاده از سیال هوا در جت شیاری برخوردی، بر روی ضریب انتقال حرارت جابجایی روی صفحه‌ی برخورد بررسی شد. نتایج بدست آمده از حل عددی در بعضی از حالات با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شدند و دقت قابل قبولی حاصل شد. با توجه به نتایج بدست آمده، مشاهده شد که بیش‌ترین نرخ انتقال حرارت مربوط به ناحیه‌ی برخورد جت با صفحه بوده و با دور شدن از ناحیه‌ی برخورد ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت به شکل قابل توجهی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد رینولدز، مقدار ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت بویژه در ناحیه‌ی برخورد افزایش چشم‌گیری دارد. و نیز مشاهده شد که عدد پرانتل آشفته در فواصل مختلف تغییر می‌کند. بنابراین فرض ثابت بودن عدد پرانتل آشفته در انتقال حرارت برخوردی دور از واقعیت بوده و مقدار متوسط آن به میزان ۰/۶۵ بدست آمد.

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

واژه‌های کلیدی: انتقال حرارت برخوردی، عدد پرانتل، عدد ناسلت، عدد رینولدز، مدل‌سازی شار حرارتی آشفته

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.4.3.2]

۱- مقدمه

انتقال حرارت برخوردی به دلیل ایجاد ضریب انتقال حرارت جابجایی نسبتا زیاد، یکی از موثرترین روش‌های خنک‌کاری در صنعت می‌باشد. کاربرد اصلی آن بر روی سطوحی است که دارای شار حرارتی بسیار بالا می‌باشند. از کاربردهای صنعتی این روش می‌توان به خنک‌کاری پره‌های توربین گاز، برش قطعات، خشک کردن کاغذ، خنک‌کاری دیواره‌ی محفظه‌ی احتراق، صنعت غذایی، الکترونیکی، شیمیایی و غیره اشاره کرد. از سیستم‌های خنک‌کاری به منظور بهینه‌سازی و افزایش راندمان استفاده می‌شود. با افزایش دمای گازهای احتراق ورودی به توربین بازده چرخه توربین گاز افزایش می‌یابد. امروزه این دما در حدود ۱۱۰۰ تا ۱۲۶۰ درجه‌ی سانتی‌گراد است. سازندگان توربین‌های گازی تلاش می‌کنند تا بتوانند این دما را به ۱۷۰۰ درجه برسانند و در آینده تا دماهای بالاتر نیز مورد نظر است [۱]. 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. در ورودی از آب برای قسمت‌های دما بالا (پره ثابت) و از هوا برای بقیه‌ی پره‌ها استفاده می‌شود [۱]. از طرفی برای خنک‌کاری هوا روش‌های مختلفی از قبیل خنک‌کاری جابجایی (این فرم از خنک‌کاری با هدایت جریان هوا به داخل پره توربین و دفع حرارت از طریق دیواره‌ها انجام می‌گیرد.)، 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.)، 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.) و خنک‌کاری نفوذی (خنک کردن با این روش احتیاج به این دارد که جریان هوای خنک-کن از دیواره سوراخ‌دار متخلخل پره عبور نماید و انتقال حرارت مستقیما بین هوای خنک کن و گاز داغ وجود دارد.) وجود دارد. اما در خنک‌کاری با آب، 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 [۱].

دیگر موردی که در انتقال حرارت بسیار موثر است و از آن برای خنک‌کاری در صنعت استفاده می‌شود جت برخوردی است. مهم‌ترین هدف استفاده از جت‌های برخوردی، خنک‌کاری سطوح با شار حرارتی بالا می‌باشد. بطور مثال، ردیف پره‌های ثابت توربین گازی بدلیل برخورد گاز-های 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 [۲]. از تحقیقاتی که در این زمینه انجام شده می‌توان به تحقیق یون وای و همکاران [۳] اشاره کرد که در آن یک فرمول جدید از متغیر عدد پرانتل آشفته برای انتقال حرارت سیالات فوق بحرانی با روش‌هایی که متفاوت با خواص فیزیکی و متغیرهای حرارت سیال می‌باشد را بیان کردند. وقتی یک سیال در فشار فوق بحرانی به دمای شبه بحرانی نزدیک می‌شود، تغییرات زیاد در خواص فیزیکی باعث می‌شود که کاربرد مدل‌های جریان آشفته مختلف مورد بحث قرار گیرد. محاسبات آن‌ها نشان داد که بدون استثنا و بیش از حد پیش‌بینی غیر واقعی دمای سیال به دمای شبه بحرانی نزدیک می‌شود. در یک پژوهش دیگر بازرگان و همکاران [۴]، با در نظر گرفتن ۴ عدد ثابت و ۴ عدد متغیر برای عدد پرانتل آشفته، تاثیر این پارامتر بر انتقال حرارت جابجایی در جریان آشفته‌ی آب فوق بحرانی را بعنوان یک سیال با خواص به شدت متغیر مورد بررسی قرار دادند. در این بررسی نتایج نشان داد که در شرایط آزمایش مورد بررسی، ۱۰ درصد افزایش در عدد پرانتل منجر به کاهش بهمین میزان در ضریب انتقال حرارت می‌شود. همچنین ایمانی‌فر و همکاران [۵] نیز تاثیر تغییر عدد پرانتل آشفتگی بر تحلیل جریان و انتقال حرارت در جت دایروی برخوردی را بررسی کردند. در پژوهش آن‌ها مدل دو معادله‌ای k-ε رینولدز پایین با ثابت‌های عمومی پیشنهاد شده توسط لاندر و شارما [۶] در راستای بهبود پیش‌بینی انتقال حرارت در جریان آشفته بهینه گردیده است. اصلاحات انجام گرفته در این مدل، شامل تغییر ضریب ثابت عبارت اضمحلال در معادله‌ی انرژی جنبشی آشفتگی و ارائه عدد پرانتل آشفتگی در معادله انرژی بعنوان تابعی از شرایط جریان و خواص سیال می‌باشد. در یک تحقیق دیگر رد جم و همکاران [۷] شبیه‌سازی عددی مستقیم از انتقال حرارت در یک جریان آشفته‌ی کاملا توسعه یافته درون لوله که تاکید اصلی آن‌ها بر روی تاثیر عدد پرانتل در انتقال حرارت آشفته درون جریان لوله می‌باشد را بررسی کردند. بررسی آن‌ها نشان داد، زمانی که عدد پرانتل افزایش یافت محدوده‌ی وزنی نوسانات دما و شار حرارتی آشفته افزایش یافته است. گرمان و همکاران [۸] اثر چرخش فن تولید شده بر روی انتقال حرارت آشفته و جریان سیال در یک لوله را بررسی کردند. اشاره آن‌ها به این است که اثرات چرخش بر روی انتقال حرارت و تنش برشی با مقایسه‌ی نتایج واقعی برای جریان متناوب چرخش با فن-هایی برای مدل منحنی دمنده‌ی استفاده شده حاصل شده است. و در غیاب چرخش، توزیع محوری ضریب انتقال حرارت محلی و برش دیوار، یک سطح پایین محلی را نشان می‌دهد. رجبی و محمدپور [۹] توزیع عدد پرانتل آشفته را در جریان انتقال حرارت جت شیاری برخوردی با عدد پرانتل آشفته ثابت ۰/۸۵ و مدل‌های شار حرارتی مختلف مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحلیل عددی در تحقیق آن‌ها نشان داد که مدل‌های شار حرارتی آشفته تاثیر محسوسی در پیش‌بینی توزیع دما و عدد ناسلت در انتقال حرارت جت برخوردی دارند. همان‌گونه که اشاره شد تاکنون تحقیقات زیادی در مورد ویژگی‌ها و اثرات عدد پرانتل آشفته بر جریان و انتقال حرارت برخوردی انجام شده است اما تا به حال مقایسه‌ای بین اعداد مختلف پرانتل و عدد پرانتل ۰/۸۵ شکل نگرفته است. لذا در تحقیق حاضر سعی شده اعداد مختلف پرانتل آشفتگی و تاثیر آن‌ها بر روی انتقال حرارت در یک جت شیاری که هندسه‌ی آن اولین بار توسط ون‌هاینگن [۱۰] ارائه شده است، بررسی شود. همچنین تفاوت نتایج این اعداد پرانتل با عدد پرانتل ۰/۸۵ مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲- معادلات حاکم

در مطالعه و بررسی رفتار پدیده‌های فیزیکی (سیالات) چنانچه از روش‌های تحلیلی، نیمه تحلیلی یا عددی (کامپیوتری) استفاده شود بایستی مدل فیزیکی، مدل ریاضی و راه حل مبتنی بر این مدل‌ها از قوانین حاکم بر آن پدیده پیروی کنند. قوانین بقای جرم و انرژی در صورتی مستقل از یکدیگرند که سرعت‌های موجود در پدیده بسیار کوچک‌تر از سرعت نور باشند. در موارد و کاربردهای متداول در مکانیک سیالات همیشه این استقلال برقرار است. معادله‌ی پیوستگی یا معادله‌ی بقای جرم در یک جریان سیال به صورت زیر بیان می‌شود [۱۱].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{X_i}(\rho u_i) = 0 \qquad (۱)$$

همچنین معادله مومنتوم برای جریان آشفته با انجام ساده سازی‌های لازم به صورت زیر می‌باشد [۱۱].

$$\rho\left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}\right) = \overline{B_i} - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{\acute{u}_i \acute{u}_j}\right) \qquad (۲)$$

تنها تفاوت معادلات آرام با آشفته نیز وجود ترم $\rho\overline{\acute{u}_i\acute{u}_j}$ در معادله می‌باشد. به طور کلی این ترم، از لحاظ فیزیکی یک تنش نمی‌باشد. بلکه بیانگر اثر تبادل اینرسی (مومنتوم) می‌باشد. فراموش نکنیم که این ترم از سمت راست معادله ممنتوم (جائیکه ترم‌های اینرسی وجود دارد) به سمت چپ منتقل شده است. بنابراین ریشه و بنیاد این ترم از جنس ممنتوم می‌باشد. معادله بقا انرژی نیز برای جریان آشفته بعد از اینکه متغییرهای وابسته به زمان اضافه می‌شود و بعد از ساده‌سازی‌ها به صورت زیر می‌باشد [۱۱].

$$\rho C_P\left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_j T_j\right) = (\lambda T_j - \rho C_P \overline{\acute{u}_j \acute{T}})_j + H \qquad (۳)$$

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.4.3.2]

که پرامتر λ در معادله (۱۳-۳) بیان‌کننده هدایت حرارتی[1] است. بدین سبب از این شکل استفاده شد تا به انرژی جنبشی آشفتگی که آن را با K نمایش می‌دهیم، اشتباه گرفته نشود. ترم $\rho C_p \acute{u}_j \acute{T}$ را اصطلاحا انتقال انتالپی (انتقال انرژی) در راستای x_i نامیده و به آن شار حرارتی آشفته گفته می‌شود. مدل‌های دو معادله‌ای بعنوان زیر بنای بسیاری از تحقیقات مربوط به مدل‌سازی جریانات آشفته، بالاخص در سالیان اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. ساده‌ترین مدل‌های کامل آشفتگی (که در عین قابلیت‌های بالا، دارای معادلات نسبتا ساده‌ای می‌باشند)، مدل‌های دو معادله‌ای هستند که در آن‌ها، حل دو معادله‌ی انتقال جداگانه باعث تعیین شدن جداگانه‌ای از مقیاس سرعت آشفتگی و مقیاس طول آشفتگی می‌شود. مدل k-ε معروف‌ترین مدل دو معادله‌ای می‌باشد. بخاطر اینکه فهم آن در برنامه نویسی ساده است. در مدل‌های Eddy-viscosity و k-ε میدان آشفته برحسب دو متغییر بیان می‌شود [۱۱].

الف) انرژی جنبشی جریان آشفته[2] (k)

$$k = \frac{1}{2}\overline{\acute{u}_i \acute{u}_i} \qquad (۴)$$

ب) نرخ اضمحلال ویسکوز انرژی جنبشی آشفته[3] (ε)

$$\varepsilon = (\frac{\mu}{\rho})\overline{\acute{u}_{i.j} \acute{u}_{i.j}} \qquad (۵)$$

در مدل استاندارد k-ε مقادیر ε و k توسط معادلات نیمه تجربی[4] زیر بدست می‌آیند [۱۱].

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j k_{.j} = \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} k_{.j}\right)_{.j} + G + B - \rho\varepsilon \qquad (۶)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u_j \varepsilon_{.j} = \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \varepsilon_{.j}\right)_{.j} + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G + C_1(1 - C_3)\frac{\varepsilon}{k} B - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \qquad (۷)$$

که در ان C_1 و C_2 و C_3 ضرائبی تجربی بوده و σ_k و σ_ϵ نیز بترتیب اعداد پرانتل و اشمیت آشفته می‌باشد. ترم‌های G، $C_1\left(\frac{\varepsilon}{k}\right)$ و $C_2\rho\left(\frac{\varepsilon^2}{k}\right)$ در معادله (۷) بترتیب بیانگر فرایندهای تولید برشی[5] و فرایندهای اضمحلال ویسکوز می‌باشند. ترم $C_1(1 - C_3)\left(\frac{\varepsilon}{k}\right) B$ بیانگر اثرات بویسانی می‌باشد.

در معادله (۶) ترم G بیان‌گر میزان تولید انرژی جنبشی آشفتگی ناشی از اندرکنش بین جریان متوسط و میدان جریان آشفته می‌باشد و از همین رو به آن اصطلاحا ترم تولید برشی گفته می‌شود. ترم B نیز بیانگر ترم تولید اتلاف بویانسی ناشی از میدان چگالی نوسان‌کننده جریان می‌باشد. روابط صریح[6] برای G و B بصورت زیر هستند [۱۱].

$$G = -\rho\overline{\acute{u}_i \acute{u}_j} u_{i.j} \qquad (۸)$$

همچنین رینولدز معیار تشخیص جریان آرام یا آشفته می‌باشد. درضمن به صورت نیروهای اینرسی به لزجت بیان می شود. این عدد به صورت زیر تعریف می شود [۱۲].

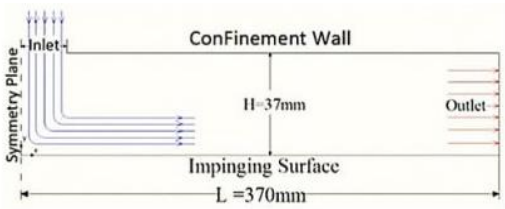
$$Re = \frac{\rho v_\infty L}{\mu} \qquad (۹)$$

عدد پرانتل آشفته نیز بصورت نسبت پخش گردابه‌ای مومنتوم به پخش گردابه‌ای گرما تعریف می‌شود [۱۳].

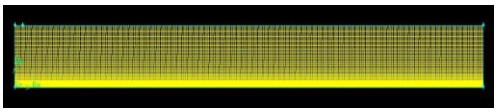
$$Pr_t = \frac{\varepsilon_M}{\varepsilon_E} \qquad (۱۰)$$

۳- توصیف هندسه و شرایط مرزی

مطابق شکل ۱ هندسه‌ی تحقیق حاضر یک جت برخوردی دو بعدی است. که با توجه به تقارن فیزیکی و هندسی آن فقط نیمی از میدان جریان برای تحلیل عددی در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی بکار رفته همانند مطالعه ون‌هاینینگن [۱۰] می‌باشد. همچنین تمام مراحل مدل‌سازی هندسی مسئله توسط نرم افزار گمبیت ۲/۴/۶ انجام و از روش جزء به کل (یعنی حل از نقطه به خط و از خط به صفحه و از صفحه به حجم بصورت گام به گام جلو می‌رود.) استفاده شده است. شبکه‌بندی هندسه نیز بصورت سازمان‌یافته تولید شده و در نزدیکی دیواره برخوردی شبکه ریزتر شده است، تا مقدار y+ در محدوده‌ی مجاز قرار گیرد. در شکل ۲ نمونه‌ای از طراحی و شبکه‌بندی صورت گرفته در گمبیت قابل مشاهده است. صفحه‌ی برخورد در دمای ثابت ۳۴۷/۷۵ درجه‌ی کلوین و دمای دیواره محدود کننده بالایی به ۳۰۹/۲۵ درجه‌ی کلوین نگه داشته شده است. فرض عدم لغزش برای تمامی دیواره‌ها اعمال شده است. دمای ورودی جت ۳۰۹/۲۵ می‌باشد. سرعت ورودی جت ۱۲/۳۳ متر بر ثانیه و قطر جت ۶/۱۶ میلی‌متر می‌باشد. همچنین رینولدز مسئله در ۵۲۰۰ است. سیال انتخابی هوا بوده و به صورت گاز ایده‌آل تراکم‌ناپذیر و در فشار اتمسفر در نظر گرفته شده است. شدت آشفتگی در نازل جت ۲٪ در نظر گرفته شده است. شرط مرزی سیال در خروج، فشار معلوم خروجی می‌باشد. دما و فشار خروجی سیال شرایط متعارف فرض شده است.



شکل ۱: محدوده‌ی محاسباتی و شرایط مرزی برای جت شیاری [۹]



شکل ۲: نمونه‌ای از شبکه‌بندی مسئله‌ی حاضر

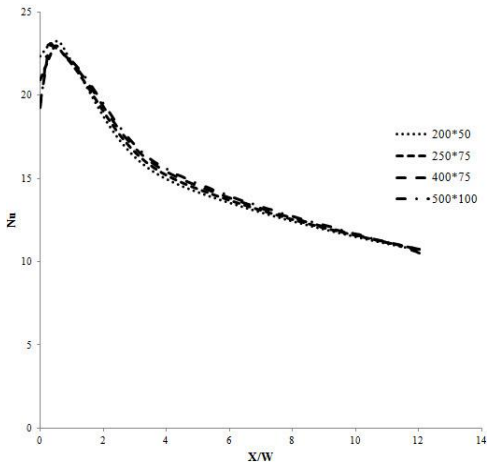
۴- حل عددی

حل معادلات حاکم بوسیله‌ی کد تجاری فلوئنت ۶/۳ انجام گرفته و برای مرتبط کردن معادلات سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. همچنین برای مدل‌سازی جریان آشفته از مدل آشفتگی k-ε استاندارد استفاده شده است. گام بعدی برای حصول اطمینان از مستقل بودن حل مسئله از تعداد شبکه‌های محاسباتی می‌باشد. در این راستا و در شکل ۳، تغییرات مقدار ناسلت در چهار شبکه‌بندی به ترتیب ۵۰*۲۰۰، ۷۵*۲۵۰، ۷۵*۴۰۰ و ۱۰۰*۵۰۰ مشاهده می‌شود. با توجه به آنچه که در شکل نمایان است، هر چه شبکه ریزتر شده است تاثیری در نتایج بدست آمده دیده نمی‌شود. بطوریکه مطابق این شکل از شبکه-

[1] Thermal Conductivity
[2] Turbulent Kinetic Energy (T.K.E)
[3] viscous Dissipation Rate of Turbulent Kinetic Energy
[4] Semi-Empirical
[5] Shear Generation Processes
[6] Exact Relations

[Downloaded from jeed.dezful.iau.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.4.3.2]

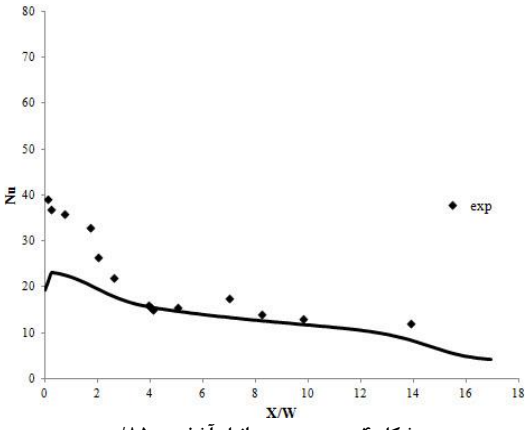
بندی ۷۵*۴۰۰ تغییرات چشم‌گیری در عدد ناسلت رخ نمی‌دهد. به همین علت از شبکه‌بندی ۷۵*۴۰۰ در ادامه‌ی تحقیق حاضر استفاده شده است.



شکل ۳: بررسی استقلال حل از شبکه

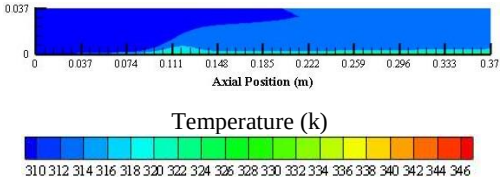
۵- تحلیل نتایج

معمولا در جریان‌های مهندسی عدد پرانتل آشفته ثابت و برابر ۰/۸۵ در نظر گرفته می‌شود. در این راستا و به منظور اعتبارسنجی حل انجام شده ابتدا در شکل ۴، مسئله با عدد پرانتل آشفته ۰/۸۵ و نتایج آزمایشگاهی ون-هاینینگن [۱۰] مورد بررسی قرار گرفته است. در نتیجه روی نقاط نتایج آزمایشگاهی (۹/۸، ۸/۲، ۵، ۴/۱، ۴، ۳/۹ = X/W) و عدد ناسلت بترتیب (۱۳، ۱۴، ۱۵/۵، ۱۵، ۱۵/۵، ۱۶ = Nu) عدد پرانتل آشفته برابر ۰/۸۵ می-باشد. همان‌گونه که در شکل ۴ مشخص است دقت نتایج قابل قبول به نظر می‌رسد، بنابراین می‌توان به صحت نتایج اطمینان حاصل کرد.



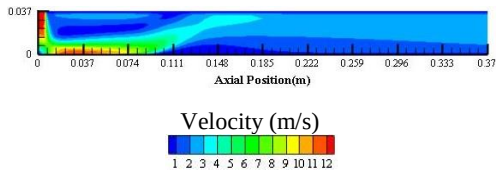
شکل ۴: بررسی عدد پرانتل آشفته‌ی ۰/۸۵

شکل ۵ کانتور دما را در عدد پرانتل ۰/۸۵ و عدد رینولدز ۵۲۰۰ نشان داده است. دما بین ۳۱۰ تا ۳۴۶ درجه‌ی کلوین در حال تغییر است. خنک‌ترین ناحیه‌ی صفحه‌ی گرم مربوط به منطقه‌ی برخورد هوای خنک جت با صفحه‌ی گرم است. در ابتدا که بیش‌ترین سرعت را داریم، پخش حرارتی در ناحیه‌ی نزدیک به نقطه‌ی برخورد بیش‌تر می‌شود و باعث خنک‌تر شدن ناحیه می‌شود. هر چه از منطقه‌ی برخورد دورتر می‌شویم، دمای صفحه افزایش یافته است.



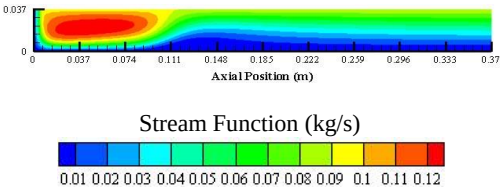
شکل ۵: کانتور دما در حل عددی با رینولدز ۵۲۰۰

شکل ۶ این بار کانتور سرعت را در عدد پرانتل ۰/۸۵ و عدد رینولدز ۵۲۰۰ نشان می‌دهد که با توجه به آن، سرعت بین ۱ تا ۱۲ متر بر ثانیه در تغییر است. بیش‌ترین سرعت مربوط به ناحیه‌ی ورودی جت می‌باشد. هر چه از ناحیه‌ی برخورد فاصله گرفته می‌شود، سرعت کم‌تر شده و در نهایت در ناحیه‌ی خروجی به کم‌ترین میزان خود می‌رسد.



شکل ۶: کانتور سرعت در حل عددی با رینولدز ۵۲۰۰

همچنین در شکل ۷ کانتور خطوط جریان در حل عددی انجام شده در عدد پرانتل ۰/۸۵ و با رینولدز ۵۲۰۰ نشان داده شده است. مقدار تابع جریان بین ۰/۰۱ تا ۰/۱۲ متغیر است. بیش‌ترین مقدار مربوط به بعد از جت و بالاتر از صفحه‌ی داغ است. از طرفی کم‌ترین مقدار مربوط به نقطه‌ی خروج از صفحه است. به این صورت که در ابتدا یک جریان چرخشی و گردابه‌ای بوجود می‌آید و هر چه به سمت خروجی نزدیک‌تر شده خطوط جریان به صورت موازی حرکت می‌کنند.



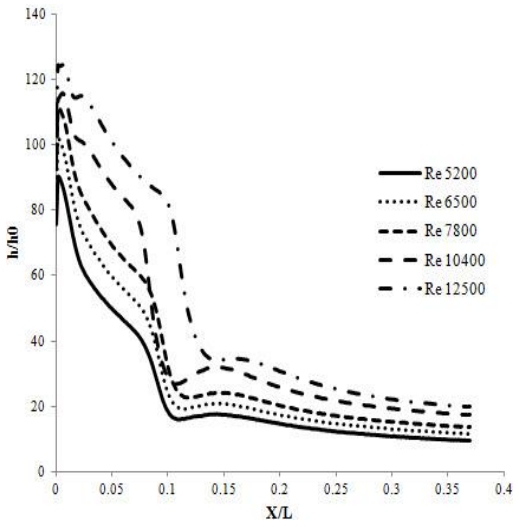
شکل ۷: کانتور خطوط جریان در حل عددی با رینولدز ۵۲۰۰

۵- ۱- بررسی تاثیر عدد رینولدز

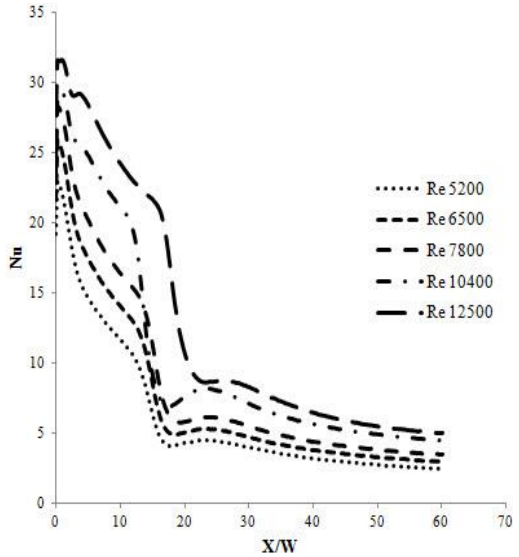
شکل‌های ۸ و ۹ تغییرات ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت در جهت جریان را برای پنج عدد رینولدز ۵۲۰۰، ۶۵۰۰، ۷۸۰۰، ۱۰۴۰۰ و ۱۲۵۰۰ نشان می‌دهد. مطابق شکل‌ها، بیش‌ترین نرخ انتقال حرارت مربوط به ناحیه‌ی برخورد (سکون) جت با صفحه بوده و با دور شدن از ناحیه‌ی برخورد ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت بطور محسوسی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد رینولدز، مقدار ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت بویژه در ناحیه‌ی برخورد افزایش قابل توجهی دارد. که این امر بعلت افزایش سرعت برخورد جت با سطح و افزایش دبی سیال خنک می‌باشد.

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.4.3.2]

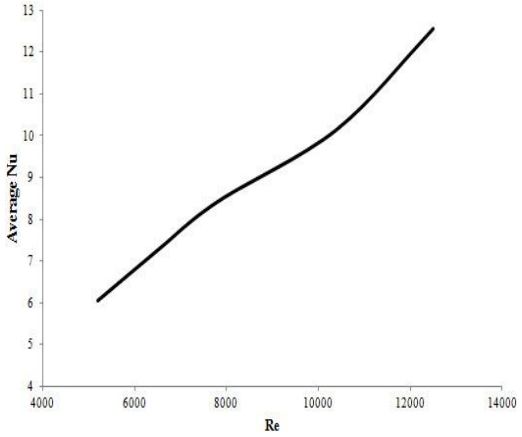


شکل ۸: تاثیر تغییرات عدد رینولدز بر روی توزیع ضریب انتقال حرارت در جهت جریان



شکل ۹: تاثیر تغییرات عدد رینولدز بر روی توزیع عدد ناسلت در جهت جریان

در شکل ۱۰ نیز تغییرات ناسلت میانگین با پنج رینولدز مختلف از قبیل ۵۲۰۰، ۶۵۰۰، ۷۸۰۰، ۱۰۴۰۰ و ۱۲۵۰۰ مورد بررسی قرار گرفته شده است. مطابق شکل با افزایش عدد رینولدز، مقدار عدد ناسلت میانگین افزایش قابل توجهی دارد که این امر بعلت افزایش سرعت برخورد جت با سطح می‌باشد. البته در جدول ۱ نیز مقادیر عدد ناسلت میانگین برای پنج عدد رینولز ذکر شده آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش عدد رینولدز از ۵۲۰۰ تا ۱۲۵۰۰ عدد ناسلت به میزان ۴۲ درصد افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۱۰: تغییرات ناسلت میانگین با رینولدزهای مختلف

جدول ۱: مقدار عدد ناسلت میانگین در اعداد رینولدز مختلف

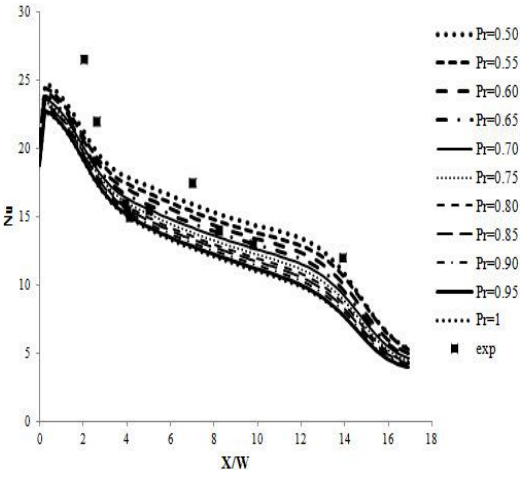
عدد رینولدز	۵۲۰۰	۶۵۰۰	۷۸۰۰	۱۰۴۰۰	۱۲۵۰۰
ناسلت میانگین	۶/۰۴	۷/۲۵	۸/۴۱	۱۰/۱۵	۱۲/۵۷

۵- ۲- اعتبارسنجی اعداد پرانتل آشفته با نتایج آزمایشگاهی

در این پژوهش برای اعتبارسنجی حل عددی از نتایج آزمایشگاهی ون‌هاینینگن [۱۰] استفاده شده است. در شکل ۱۱ تغییرات عدد ناسلت را با تغییر عدد پرانتل آشفته در عدد رینولدز ۵۲۰۰ و نتایج آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. با افزایش عدد پرانتل آشفته ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت کاهش می‌یابد. دلیل این امر کاهش گرادیان سرعت در جهت جریان با فاصله گرفتن از صفحه‌ی برخورد می‌باشد. در شکل ۱۱ روی نقاط آزمایشگاهی (۴/۱، ۴، ۳/۹ = X/W) با عدد ناسلت (۱۶، ۱۵/۵، ۱۵ = Nu)، پرانتل آشفته از ۰/۶۵ تا ۱ تغییر می‌کند. در حالی که در نقطه‌ی X/W=۵ با عدد ناسلت ۱۵/۵، پرانتل آشفته از ۰/۶۵ تا ۰/۷۵ تغییر می‌کند. از طرفی در نقطه‌ی X/W= ۹/۸ با Nu =۱۳ پرانتل آشفته بین ۰/۶ تا ۰/۷ متغیر است. همچنین در نقطه‌ی X/W=۱۳/۹ و Nu=۱۲ پرانتل آشفته حدود ۰/۵ می‌باشد. بنابراین افزایش عدد رینولدز منجر به افزایش عدد پرانتل آشفته در نواحی نزدیک دیواره شده ولی با افزایش فاصله از دیواره تاثیر محسوسی در مقدار پرانتل آشفته مشاهده نمی‌شود.

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

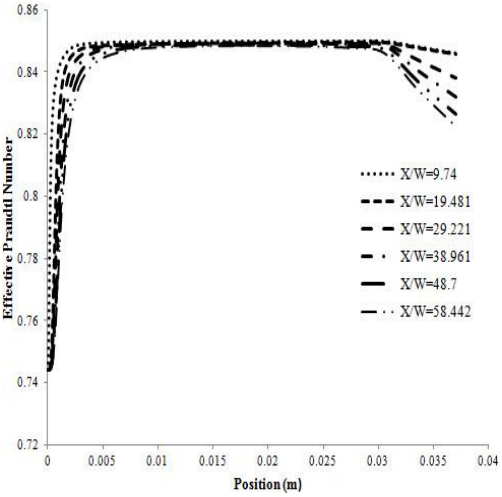
[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.4.3.2]



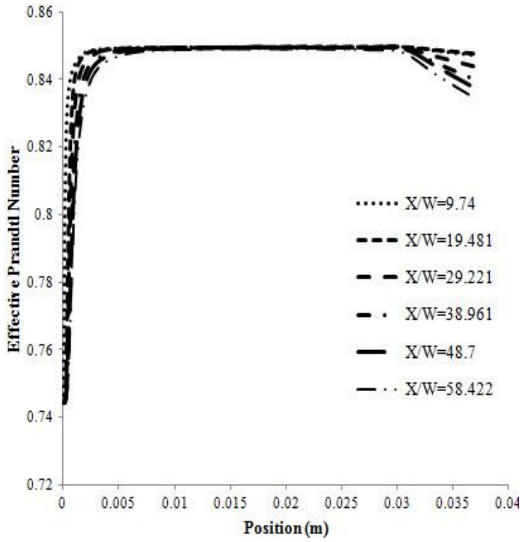
شکل ۱۱: بررسی اعداد پرانتل آشفته مختلف

۵- ۳- تغییرات عدد پرانتل موثر

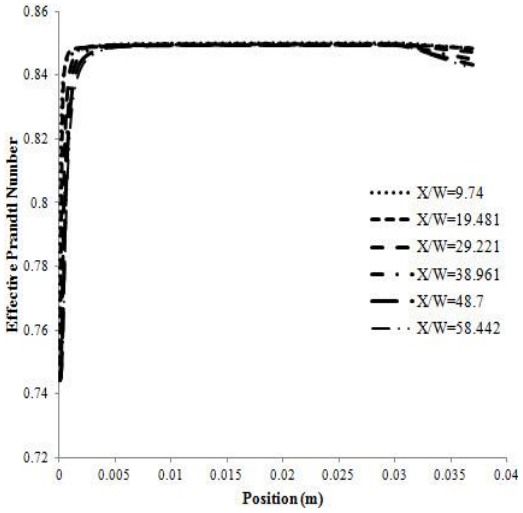
در ابتدا محدوده‌ی محاسباتی جت شیاری برخوردی را به شش قسمت مساوی تقسیم شده است. در شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ تغییرات عدد پرانتل موثر در سه رینولدز ۵۲۰۰، ۷۸۰۰ و ۱۲۵۰۰ مورد بررسی قرار گرفته شده است. در همه‌ی این نمودارها عدد پرانتل موثر از مقادیر ۰/۷۴ تا ۰/۸۴ تغییر می‌کند و بر این اساس فرض ثابت بودن عدد پرانتل آشفته غیر صحیح می‌باشد. برای جریان انتقال حرارت برخوردی شیب عدد پرانتل آشفته رو به پایین است. علت آن آشفته بودن جریان در این محل می‌باشد.



شکل ۱۲: تغییرات عدد پرانتل موثر در رینولدز ۵۲۰۰



شکل ۱۳: تغییرات عدد پرانتل موثر در رینولدز ۷۸۰۰



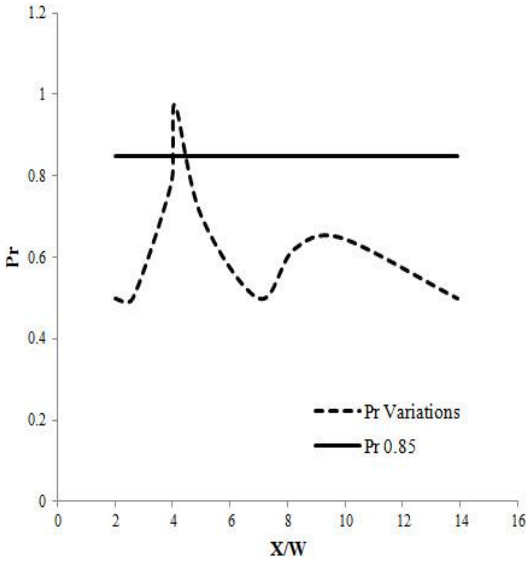
شکل ۱۴: تغییرات عدد پرانتل موثر در رینولدز ۱۲۵۰۰

۵- ۴- نحوه‌ی تغییرات عدد پرانتل آشفته در راستای صفحه‌ی برخورد

در شکل ۱۵ مقایسه‌ی تغییرات اعداد پرانتل آشفته مختلف با عدد پرانتل آشفته‌ی ۰/۸۵ و نتایج آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا اعداد پرانتل آشفته روی نقاط آزمایشگاهی به این صورت مشخص شدند که نقاط آزمایشگاهی (۱۳/۹، ۹/۸، ۸/۲، ۷، ۵، ۴/۱، ۴، ۳/۹، ۲/۶، ۲ = X/W) بترتیب روی اعداد پرانتل آشفته (۰/۵ ، ۰/۶۵، ۰/۶۲، ۰/۵، ۰/۷، ۰/۹۷، ۰/۸۷، ۰/۷۷، ۰/۵، ۰/۵ = Prt) قرار می‌گیرند. در نهایت و با بررسی نتایج مشخص شد که عدد پرانتل آشفته میانگین برابر با ۰/۶۵ بوده و مورد استفاده قرار می‌گیرد.

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.4.3.2]



شکل ۱۵: مقایسه‌ی تغییرات عدد پرانتل آشفته مختلف با عدد پرانتل ۰/۸۵

۶- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به بررسی استفاده از جت شیاری برخوردی در حالت آشفته و تاثیر عدد پرانتل آشفته و عدد رینولدز بمنظور افزایش انتقال حرارت پرداخته شد. برای بررسی، سیال هوا در نظر گرفته شده و از مدل آشفتگی k-ε استاندارد استفاده شده است. برای حل عددی، شبکه‌ای بصورت سازمان‌یافته تولید شده و در نزدیکی دیواره برخوردی شبکه ریزتر شده است، تا مقدار y^+ در محدوده‌ی مجاز قرار گیرد. در این راستا تغییرات عدد ناسلت در چهار شبکه‌بندی مختلف انجام شد. مشاهده شد که هر چه شبکه ریزتر می‌شود تاثیری در نتایج بدست آمده ندارد. بطوریکه مطابق نتایج بدست آمده، در شبکه‌بندی ۷۵*۴۰۰ تغییرات چشم‌گیری در عدد ناسلت رخ نمی‌دهد. به همین علت از شبکه‌بندی ۷۵*۴۰۰ در ادامه‌ی تحقیق حاضر استفاده شده است. عدد پرانتل آشفته در جریان‌های مهندسی معمولا ثابت و برابر ۰/۸۵ در نظر گرفته می‌شود. در ادامه، بررسی عدد پرانتل آشفته ۰/۸۵ و نتایج آزمایشگاهی ون-هاینینگن [۱۰] و همچنین اعداد دیگر پرانتل آشفتگی نشان داد که روی نقاط آزمایشگاهی مختلف عدد پرانتل آشفته تغییر می‌کند. علاوه بر این نتایج بدست آمده در تحقیق حاضر نشان می‌دهند که فرض ثابت بودن عدد پرانتل آشفته در انتقال حرارت برخوردی دور از واقعیت بوده و این پارامتر در جت شیاری برخوردی در محدوده‌ی ۰/۵ تا ۱ تغییر می‌کند. و در نهایت بر اساس نتایج، عدد پرانتل آشفته میانگین برابر ۰/۶۵ می‌باشد. در تحلیل نتایج ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت به این نکته دست یافته شد که بیش‌ترین نرخ انتقال حرارت مربوط به ناحیه‌ی برخورد جت با صفحه بوده و با دور شدن از ناحیه‌ی برخورد ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت بطور محسوسی کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش عدد رینولدز، مقدار ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت بویژه در ناحیه‌ی برخورد افزایش قابل توجهی دارد. که این امر بعلت افزایش سرعت برخورد جت با سطح و افزایش دبی سیال خنک می‌باشد. همچنین افزایش عدد رینولدز منجر به افزایش عدد پرانتل آشفته در نواحی نزدیک دیواره شده ولی با افزایش فاصله از دیواره، تاثیر محسوسی در مقدار پرانتل آشفته احساس نشد. همچنین تغییرات عدد ناسلت با تغییر عدد پرانتل آشفته در رینولدز ۵۲۰۰ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش عدد پرانتل آشفته ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت کاهش می‌یابد. دلیل این امر کاهش گرادیان سرعت در جهت جریان با فاصله گرفتن از صفحه‌ی برخورد می‌باشد. همچنین مشاهده شد که روی نقاط مختلف نتایج آزمایشگاهی، عدد پرانتل تغییر می‌کند. در ادامه تغییرات عدد پرانتل موثر در شش قسمت مساوی در محدوده‌ی محاسباتی جت شیاری برخوردی و در سه عدد رینولدز مختلف بررسی شد. داده‌های فلوئنت نشان دادند که در هر سه عدد رینولدز مختلف، عدد پرانتل موثر از ۰/۷۴ تا ۰/۸۴ تغییر می‌کند. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که فرض ثابت بودن عدد پرانتل آشفته در انتقال حرارت برخوردی غیر صحیح می‌باشد.

فهرست علائم

علائم انگلیسی

u_i', u_j'	تغییر سرعت محوری و شعاعی، m/s
u_i, u_j	سرعت محوری و شعاعی، m/s
Pr_t	عدد پرانتل آشفتگی، $Pr_t = C_p u / \lambda$
Re	رینولدز
k	انرژی جنبشی آشفتگی، m^2/s^2
G	تولید انرژی جنبشی آشفتگی
y^+	فاصله بی‌بعد از دیواره
B	تولید اتلاف بویانسی
T	درجه حرارت، k
V_∞	سرعت جریان آزاد
L	طول مقیاس هندسی

علائم یونانی

ρ	غلظت، kg / m^3
α	ضریب جذب
σ_s	ضریب پخش
σ_k	عدد پرانتل آشفتگی

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.4.3.2]

هدایت حرارتی	λ	
ویسکوزیته دینامیکی، kg / m.s	μ	

مراجع

[1] A., Peivandi, M., koochaki, Investigating the Types of Gas Turbine Blades Cooling Techniques, Wikipower .ir,

[2] 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).

[3] Y. B., Yoon, A new formulation of variable turbulent Prandtl number for heat transfer to supercritical fluids, International Journal of Heat and Mass Transfer, 92 (2016) 792-806.

[4] 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).

[5] 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).

[6] 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.

[7] 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.

[8] J. M., Gorman, E. M., Sparrow, S., Ilamparuthi, W. J., Minkowycz, Effect of fan-generated swirl on turbulent heat transfer and fluid flow in a pipe, International Journal of Heat and Mass Transfer, 95 (2016) 1019–1025.

[9] 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.

[10] 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).

[11] M., Sanieinejad, An Introduction to the Context of Turbulent Flows and Modeling, Third Edition, (2005).

[12] M., Rezaeinia, Fluid Mechanics, Translate, Omidenghelab Publishing, Tehran, (2010).

[13] W. M., Kays, M. E., Crawford, Convective heat and mass transfer, 3rd Ed., McGraw Hill, N.Y., (1993).

[14] User guide Ansys Fluent 6/3.

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

[DOR: 20.1001.1.20089813.1397.5.4.3.2]