

تأثیر عدد پرانتل آشفته بر مدل سازی 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 آمری، 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 مدل های مختلف جریان آشفته در حالت ها و ویژگی های مختلف به میزان زیادی احساس می شود. از این رو در پژوهش حاضر به بررسی تأثیر تغییرات عدد پرانتل آشفته در جریان انتقال حرارت جت شیاری بر خوردی پرداخته شده است. برای مدل سازی جریان آشفته با استفاده از کد تجاری فلونت ۶/۳، مدل آشفتهگی k-ε استاندارد استفاده شد. پس از آن با بررسی استقلال حل از شبکه، بهترین شبکه بندی یعنی ۴۰۰*۷۵ برای مدل سازی 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 بر خوردی، بر روی ضریب انتقال حرارت جابجایی روی صفحه ی 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 ناحیه ی برخورد جت با صفحه بوده و با دور شدن از ناحیه ی برخورد ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت به شکل قابل توجهی کاهش می یابد. همچنین با افزایش عدد رینولدز، مقدار ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت بویژه در ناحیه ی برخورد افزایش چشمگیری دارد. و نیز مشاهده شد که عدد پرانتل آشفته در فواصل مختلف تغییر می کند. 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.

* عهده دار مکاتبات: aliershadi110@Gmail.com

واژه های کلیدی: انتقال حرارت برخوردی، عدد پرانتل، عدد ناسلت، عدد رینولدز، مدل سازی شار حرارتی آشفته

۱- مقدمه

انتقال حرارت برخوردی به دلیل ایجاد ضریب انتقال حرارت جابجایی نسبتاً زیاد، یکی از موثرترین روش های خنک کاری در صنعت می باشد. کاربرد اصلی آن بر روی سطوحی است که دارای شار حرارتی بسیار بالا می باشند. از کاربردهای صنعتی این روش می توان به خنک کاری پره های توربین گاز، برش قطعات، خشک کردن کاغذ، خنک کاری دیواره ی محفظه ی احتراق، صنعت غذایی، الکترونیک، شیمیایی و غیره اشاره کرد. از سیستم های خنک کاری به منظور بهینه سازی و افزایش راندمان استفاده می شود. با افزایش دمای گازهای احتراق ورودی به توربین بازده چرخه توربین گاز افزایش می یابد. امروزه این دما در حدود ۱۱۰۰ تا ۱۲۶۰ درجه ی سانتی گراد است. سازندگان توربین های گازی تلاش می کنند 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 تنش های گرمایی در پره های متحرک و کاهش طول عمر پره می شود. به طور کلی دمای سطح پره باید در

کمتر از ۹۰۰ درجه سانتی گراد باشد تا خوردگی پره از حد مجاز تجاوز نکند. خنک کاری پره با خالی کردن داخل آن و جاری کردن شاره خنک کننده از فضای خالی شده امکان پذیر می باشد. پره توخالی سبک تر از پره تو پر بوده و عدد بیو در آن خیلی کوچک تر است و از این رو توزیع دما در آن نسبتاً یکنواخت می باشد. شاره های خنک کننده هوا و آب می باشند. از هوا تا دمای ۱۱۵۰ درجه ی سانتی گراد، از آب نیز تا دمای ۱۳۱۵ درجه ی سانتی گراد و از سیستم ترکیبی در بین این دو دما استفاده می شود. در ورودی از آب برای قسمت های دما بالا (پره ثابت) و از هوا برای بقیه ی پره ها استفاده می شود [۱]. از طرفی برای خنک کاری هوا روش های مختلفی از قبیل خنک کاری جابجایی (این فرم از خنک کاری با هدایت جریان هوا به داخل پره توربین و دفع حرارت از طریق دیواره ها انجام می گیرد)، خنک کاری پاششی (این نوع خنک کاری در واقع همان نوع جابجایی ولی با شدت بسیار بالا می باشد که در آن هوا با سرعت بسیار زیاد به صورت فواره به سطح داخلی ایرفویل افشاند می گردد و باعث می شود که انتقال حرارت زیادی از سطح فلز به هوای خنک کن صورت گیرد)، خنک کاری لایه ای (این نوع خنک کاری براین اساس کار می کند که یک لایه عایق هوا بین گاز داغ و پره برقرار می گردد و

انتقال حرارت را به دیواره پره از طرف گاز داغ کم می کند. و خنک کاری نفوذی (خنک کردن با این روش احتیاج به این دارد که جریان هوای خنک- کن از دیواره سوراخ دار متخلخل پره عبور نماید و انتقال حرارت مستقیماً بین هوای خنک کن و گاز داغ وجود دارد. وجود دارد. اما در خنک کاری با آب، آب از داخل لوله هایی نازک که در پره تعبیه شده است عبور می کند و از نوک پره بصورت بخار بیرون می آید. در این صورت به بهترین شکل ممکن خنک کاری صورت می گیرد. با این روش می توان درجه حرارت پره را حتی کم تر از ۵۴۰ درجه نگهداشت [۱].

دیگر موردی که در انتقال حرارت بسیار موثر است و از آن برای خنک کاری در صنعت استفاده می شود جت برخوردی است. مهم ترین هدف استفاده از جت های برخوردی، خنک کاری سطوح با شار حرارتی بالا می باشد. بطور مثال، ردیف پره های ثابت توربین گازی بدلیل برخورد گاز- های داغ دارای شار انتقال حرارت بالایی هستند. از طرفی خنک کاری پره ها با جت سیال خنک کن که از داخل به سطح پره برخورد می کند، باعث انتقال حرارت متمرکز روی سطح پره شده و راندمان توربین افزایش می یابد. همچنین جت های برخوردی در خشک کن ها، صنایع فولاد و خنک کاری قطعات الکترونیک دارای کاربرد فراوان می باشند. طبقه بندی کلی این جت ها شامل جت های 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 می توان به تحقیق یون وای و همکاران [۳] اشاره کرد که در آن یک فرمول جدید از متغیر عدد پراتل آشفته برای انتقال حرارت سیالات فوق بحرانی با روش هایی که متفاوت با خواص فیزیکی و متغیرهای حرارت سیال می باشد را بیان کردند. وقتی یک سیال در فشار فوق بحرانی به دمای شبه بحرانی نزدیک می شود، تغییرات زیاد در خواص فیزیکی باعث می شود که کاربرد مدل های جریان آشفته مختلف مورد بحث قرار گیرد. محاسبات آن ها نشان داد که بدون استثنا و بیش از حد پیش بینی غیر واقعی دمای سیال به دمای شبه بحرانی نزدیک می شود. در یک پژوهش دیگر بازرگان و همکاران [۴]، با در نظر گرفتن ۴ عدد ثابت و ۴ عدد متغیر برای عدد پراتل آشفته، تأثیر این پارامتر بر انتقال حرارت جابجایی در جریان آشفته ی 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 پراتل منجر به کاهش بهمین میزان در ضریب انتقال حرارت می شود. همچنین ایمانی فر و همکاران [۵] نیز تأثیر تغییر عدد پراتل آشفته بر تحلیل جریان و انتقال حرارت در جت دایروی برخوردی را بررسی کردند. در پژوهش آن ها مدل دو معادله ای k-ε رینولدز پایین با ثابت های عمومی پیشنهاد شده توسط لاندرو و شارما [۶] در راستای بهبود پیش بینی انتقال حرارت در جریان آشفته بهینه گردیده است. اصلاحات انجام گرفته در این مدل، شامل تغییر ضریب ثابت عبارت اضمحلال در معادله انرژی جنبشی آشفته و ارائه عدد پراتل آشفته در معادله انرژی بعنوان تابعی از شرایط جریان و خواص سیال می باشد. در یک تحقیق دیگر رد جم و همکاران [۷] شبیه سازی عددی مستقیم از انتقال حرارت در یک جریان آشفته کاملاً توسعه یافته درون لوله که تأکید اصلی آن ها بر روی تأثیر عدد پراتل در انتقال حرارت آشفته درون جریان لوله می باشد را بررسی کردند. بررسی آن ها نشان داد، زمانی که عدد پراتل افزایش یافت محدوده ی 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 آن ها به این است که اثرات چرخش بر روی انتقال حرارت و تنش برشی با مقایسه ی نتایج واقعی برای جریان متناوب چرخش با فن- هایی برای مدل منحنی دمنده ی استفاده شده حاصل شده است. و در غیاب چرخش، توزیع محوری ضریب انتقال حرارت محلی و برش دیوار، یک سطح پایین محلی را نشان می دهد. رجبی و محمدپور [۹] توزیع عدد پراتل آشفته را در جریان انتقال حرارت جت شکاری برخوردی با عدد پراتل آشفته ثابت ۰/۸۵ و مدل های شار حرارتی مختلف مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحلیل عددی در تحقیق آن ها نشان داد که مدل های شار حرارتی آشفته تأثیر محسوسی در پیش بینی توزیع دما و عدد ناسلت در انتقال حرارت جت برخوردی دارند. همان گونه که اشاره شد تاکنون تحقیقات زیادی در مورد ویژگی ها و اثرات عدد پراتل آشفته بر جریان و انتقال حرارت برخوردی انجام شده است اما تا به حال مقایسه ای بین اعداد مختلف پراتل و عدد پراتل ۰/۸۵ شکل نگرفته است. لذا در تحقیق حاضر سعی شده اعداد مختلف پراتل آشفته و تأثیر آن ها بر روی انتقال حرارت در یک جت شکاری که هندسه ی آن اولین بار توسط ون هاینکن [۱۰] ارائه شده است، بررسی شود. همچنین تفاوت نتایج این اعداد پراتل با عدد پراتل ۰/۸۵ مورد ارزیابی قرار گیرد.

۲- معادلات حاکم

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

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

همچنین معادله مومنوم برای جریان آشفته با انجام ساده سازی های لازم به صورت زیر می باشد [۱۱].

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = \bar{B}_i - \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \overline{\rho u_i u_j} \right) \quad (2)$$

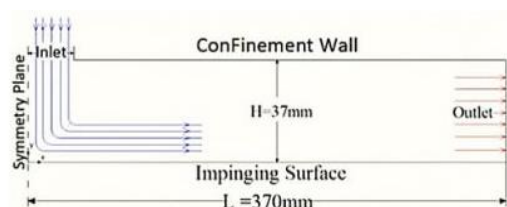
تنها تفاوت معادلات آرام با آشفته نیز وجود ترم $\overline{\rho u_i u_j}$ در معادله می باشد. به طور کلی این ترم، از لحاظ فیزیکی یک تنش نمی باشد. بلکه بیانگر اثر تبادل اینرسی (مومنوم) می باشد. فراموش نکنیم که این ترم از سمت راست معادله مومنوم (جائیکه ترم های اینرسی وجود دارد) به سمت چپ منتقل شده است. بنابراین ریشه و بنیاد این ترم از جنس مومنوم می باشد. معادله بقا انرژی نیز برای جریان آشفته بعد از اینکه متغیرهای وابسته به زمان اضافه می شود و بعد از ساده سازی ها به صورت زیر می باشد [۱۱].

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u_j T_j \right) = (\lambda T_j - \rho C_p \overline{u_j T})_j + H \quad (3)$$

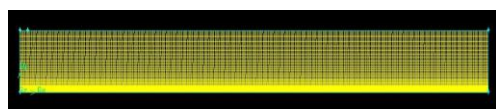
$$Pr_t = \frac{\varepsilon M}{\varepsilon_E} \quad (10)$$

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 $347/75$ درجه‌ی کلون و دمای دیواره محدود کننده بالایی به $309/25$ درجه‌ی کلون نگه داشته شده است. فرض عدم لغزش برای تمامی دیواره‌ها اعمال شده است. دمای ورودی جت $309/25$ می‌باشد. سرعت ورودی جت $12/33$ متر بر ثانیه و قطر جت $6/16$ میلی‌متر می‌باشد. همچنین رینولدز مسئله در 5200 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 2% 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 شیار [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 $k-\varepsilon$ 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 50×200 ، 75×250 ، 100×400 و 100×500 مشاهده می‌شود. با توجه به آنچه که در شکل نمایان است، هر چه شبکه ریزتر شده است تأثیری در نتایج بدست آمده دیده نمی‌شود. بطوریکه مطابق این شکل از شبکه-

که پرامتر λ در معادله (۳-۱۳) بیان‌کننده هدایت حرارتی ۱ است. بدین سبب از این شکل استفاده شد تا به انرژی جنبشی آشفتگی که آن را با K نمایش می‌دهیم، اشتباه گرفته نشود. ترم $\rho C_p \bar{u}_i \bar{u}_j \bar{T}$ را اصطلاحاً 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 نسبتاً 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 $k-\varepsilon$ معروف‌ترین مدل دو معادله‌ای می‌باشد. بخاطر اینکه فهم آن در برنامه نویسی ساده است. در مدل‌های Eddy-viscosity و $k-\varepsilon$ میدان آشفته برحسب دو متغیر بیان می‌شود [۱۱].

الف) انرژی جنبشی جریان آشفته k

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_i} \quad (4)$$

ب) نرخ اضمحلال ویسکوز انرژی جنبشی آشفته ε

$$\varepsilon = \left(\frac{\mu}{\rho} \right) \overline{u_{i,j} u_{i,j}} \quad (5)$$

در مدل استاندارد $k-\varepsilon$ مقادیر k و ε توسط معادلات نیمه تجربی ۴ زیر بدست می‌آیند [۱۱].

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u_j k_{,j} = \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} k_{,j} \right)_{,j} + G + B - \rho \varepsilon \quad (6)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u_j \varepsilon_{,j} = \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \varepsilon_{,j} \right)_{,j} + C_1 \frac{\varepsilon}{k} G + C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (7)$$

که در آن C_1 و C_2 و C_3 ضرایبی تجربی بوده و σ_k و σ_ε نیز بترتیب اعداد پرانتل و اشمیت آشفته می‌باشد. ترم‌های G و $C_1 \left(\frac{\varepsilon}{k} \right) G$ و $C_2 \rho \left(\frac{\varepsilon^2}{k} \right)$ در معادله (۷) بترتیب بیانگر فرایندهای تولید برشی Δ 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 اصطلاحاً ترم تولید برشی گفته می‌شود. ترم B نیز بیانگر ترم تولید اتلاف بویانسی ناشی از میدان چگالی نوسان‌کننده جریان می‌باشد. روابط صریح ۶ برای G و B بصورت زیر هستند [۱۱].

$$G = -\rho \overline{u_i u_j} u_{i,j} \quad (8)$$

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

$$Re = \frac{\rho v_\infty L}{\mu} \quad (9)$$

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

¹ Thermal Conductivity

² Turbulent Kinetic Energy (T.K.E)

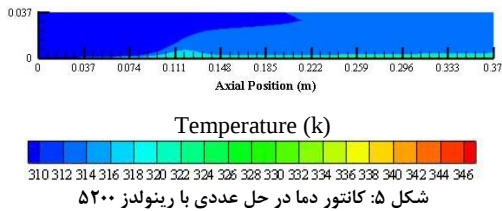
³ viscous Dissipation Rate of Turbulent Kinetic Energy

⁴ Semi-Empirical

⁵ Shear Generation Processes

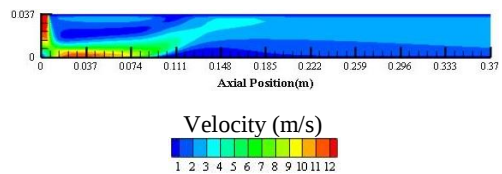
⁶ Exact Relations

خنک تر شدن ناحیه می شود. هر چه از منطقه ی برخورد دورتر می شویم، دمای صفحه افزایش یافته است.



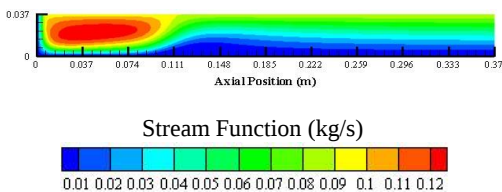
شکل ۵: کانتور دما در حل عددی با رینولدز ۵۲۰۰

شکل ۶ این بار کانتور سرعت را در عدد پرانتل ۰/۸۵ و عدد رینولدز ۵۲۰۰ نشان می دهد که با توجه به آن، سرعت بین ۱ تا ۱۲ متر بر ثانیه در تغییر است. بیش ترین سرعت مربوط به ناحیه ی ورودی جت می باشد. هر چه از ناحیه ی برخورد فاصله گرفته می شود، سرعت کم تر شده و در نهایت در ناحیه ی خروجی به کم ترین میزان خود می رسد.



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. بیش ترین مقدار مربوط به بعد از جت و بالاتر از صفحه ی داغ است. از طرفی کم ترین مقدار مربوط به نقطه ی خروج از صفحه است. به این صورت که در ابتدا یک جریان چرخشی و گردابه ای بوجود می آید و هر چه به سمت خروجی نزدیک تر شده خطوط جریان به صورت موازی حرکت می کنند.

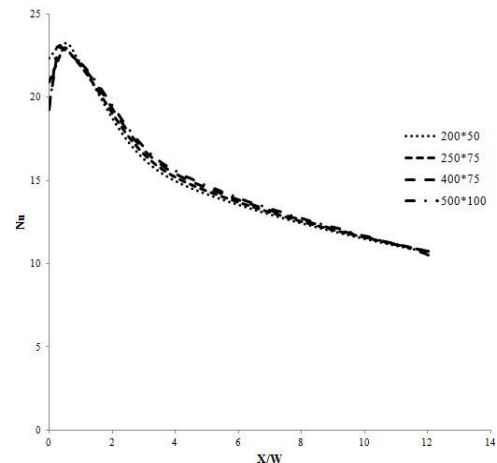


شکل ۷: کانتور خطوط جریان در حل عددی با رینولدز ۵۲۰۰

۵-۱- بررسی تاثیر عدد رینولدز

شکل های 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 می دهد. مطابق شکل ها، بیش ترین نرخ انتقال حرارت مربوط به ناحیه ی برخورد (سکون) جت با صفحه بوده و با دور شدن از ناحیه ی برخورد ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت بطور محسوسی کاهش می یابد. همچنین با افزایش عدد رینولدز، مقدار ضریب انتقال حرارت و عدد ناسلت بویژه در ناحیه ی برخورد افزایش قابل توجهی دارد. که این امر بعلا افزایش سرعت برخورد جت با سطح و افزایش دبی سیال خنک می باشد.

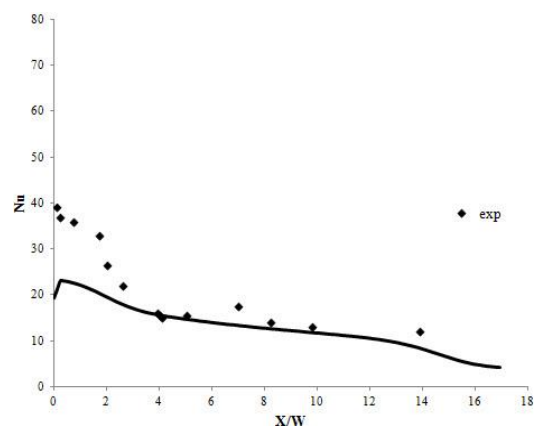
بندی ۷۵*۴۰۰ تغییرات چشم گیری در عدد ناسلت رخ نمی دهد. به همین علت از شبکه بندی ۷۵*۴۰۰ در ادامه ی تحقیق حاضر استفاده شده است.



شکل ۳: بررسی استقلال حل از شبکه

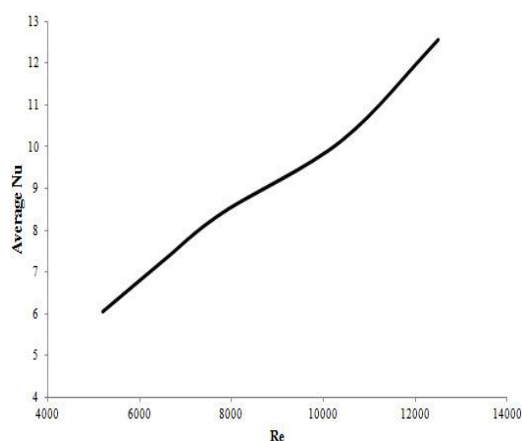
۵- تحلیل نتایج

معمولا در جریان های مهندسی عدد پرانتل آشفته ثابت و برابر ۰/۸۵ در نظر گرفته می شود. 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) و عدد ناسلت بترتیب (۱۳، ۱۴، ۱۵/۵، ۱۵، ۱۵/۵، ۱۶) عدد پرانتل آشفته برابر ۰/۸۵ می باشد. همان گونه که در شکل ۴ مشخص است دقت نتایج قابل قبول به نظر می رسد، بنابراین می توان به صحت نتایج اطمینان حاصل کرد.



شکل ۴: بررسی عدد پرانتل آشفته ۰/۸۵

شکل ۵ کانتور دما را در عدد پرانتل ۰/۸۵ و عدد رینولدز ۵۲۰۰ نشان داده است. دما بین ۳۱۰ تا ۳۴۶ درجه ی کلوین در حال تغییر است. خنک ترین ناحیه ی صفحه ی گرم مربوط به منطقه ی برخورد هوای خنک جت با صفحه ی گرم است. در ابتدا که بیش ترین سرعت را داریم، پخش حرارتی در ناحیه ی نزدیک به نقطه ی برخورد بیش تر می شود و باعث



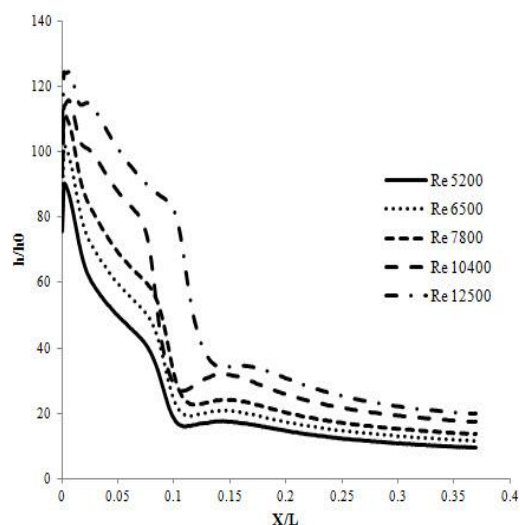
شکل ۱۰: تغییرات ناسلت میانگین با رینولدزهای مختلف

جدول ۱: مقدار عدد ناسلت میانگین در اعداد رینولدز مختلف

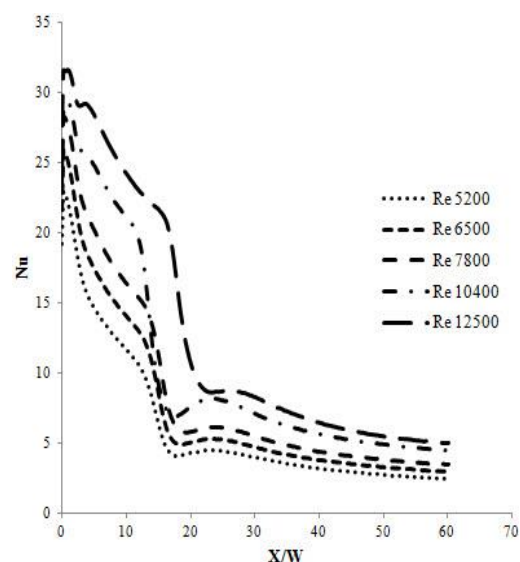
عدد رینولدز	۵۲۰۰	۶۵۰۰	۷۸۰۰	۱۰۴۰۰	۱۲۵۰۰
ناسلت میانگین	۶/۰۴	۷/۲۵	۸/۴۱	۱۰/۱۵	۱۲/۵۷

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 گردادیان سرعت در جهت جریان با فاصله گرفتن از صفحه‌ی برخورد می‌باشد. در شکل ۱۱ روی نقاط آزمایشگاهی ($X/W = 3/9, 4/4, 4/1$) با عدد ناسلت (۱۶، ۱۵/۵، ۱۵)، پرانتل آشفته از ۰/۶۵ تا ۱ تغییر می‌کند. در حالی که در نقطه‌ی $X/W=5$ با عدد ناسلت ۱۵/۵، پرانتل آشفته از ۰/۶۵ تا ۰/۷۵ تغییر می‌کند. از طرفی در نقطه‌ی $X/W=9/8$ با $Nu=13$ پرانتل آشفته بین ۰/۶ تا ۰/۷ متغیر است. همچنین در نقطه‌ی $X/W=13/9$ و $Nu=12$ 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.

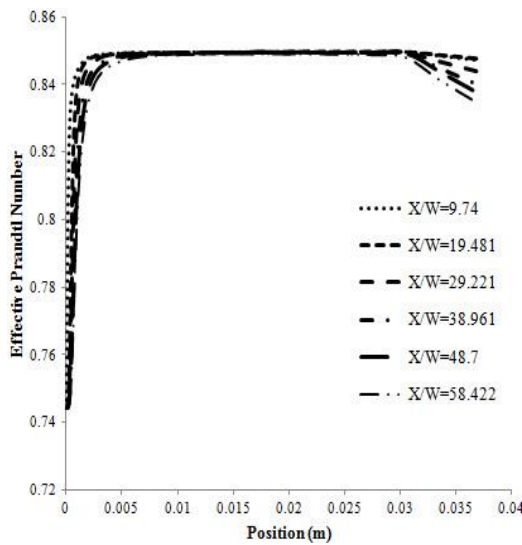


شکل ۸: تاثیر تغییرات عدد رینولدز بر روی توزیع ضریب انتقال حرارت در جهت جریان

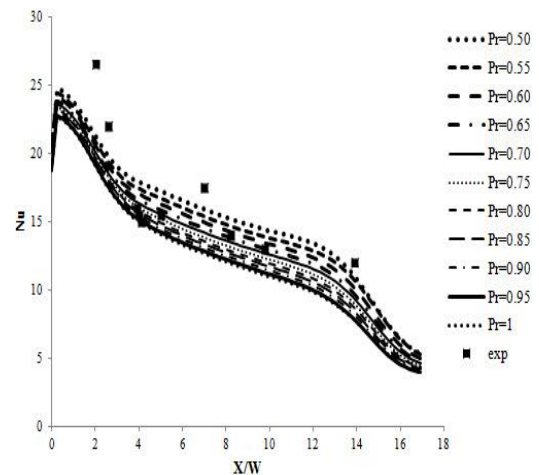


شکل ۹: تاثیر تغییرات عدد رینولدز بر روی توزیع عدد ناسلت در جهت جریان

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 بعلا افزایش سرعت برخورد جت با سطح می‌باشد. البته در جدول ۱ نیز مقادیر عدد ناسلت میانگین برای پنج عدد رینولدز 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.



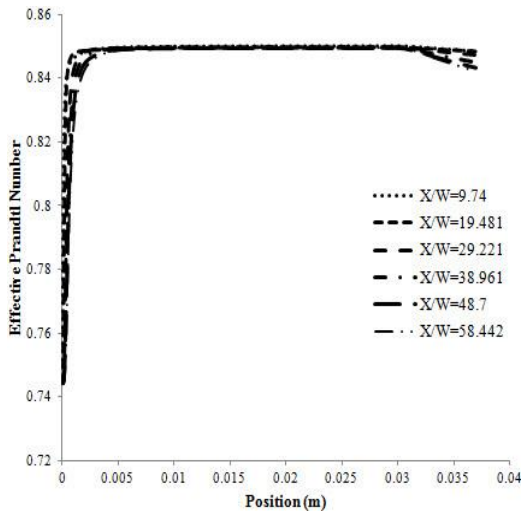
شکل ۱۳: تغییرات عدد پراتنل موثر در رینولدز ۷۸۰۰



شکل ۱۱: بررسی اعداد پراتنل آشفته مختلف

۵-۳- تغییرات عدد پراتنل موثر

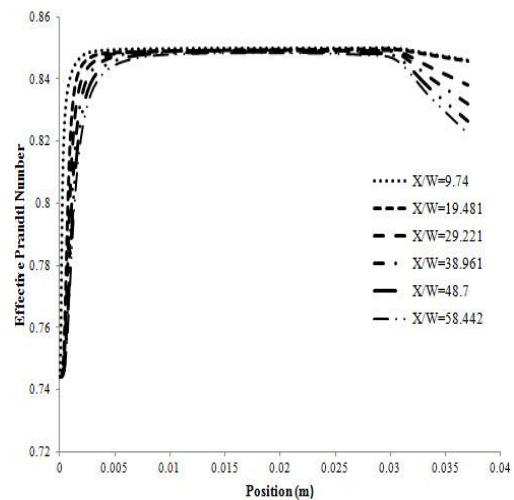
در ابتدا محدوده‌ی محاسباتی جت شیری برخوردی را به شش قسمت مساوی تقسیم شده است. در شکل‌های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ تغییرات عدد پراتنل موثر در سه رینولدز ۵۲۰۰، ۷۸۰۰ و ۱۲۵۰۰ مورد بررسی قرار گرفته شده است. در همه‌ی این نمودارها عدد پراتنل موثر از مقادیر ۰/۷۴ تا ۰/۸۴ تغییر می‌کند و بر این اساس فرض ثابت بودن عدد پراتنل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



شکل ۱۴: تغییرات عدد پراتنل موثر در رینولدز ۱۲۵۰۰

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

در شکل ۱۵ مقایسه‌ی تغییرات اعداد پراتنل آشفته مختلف با عدد پراتنل آشفته‌ی ۰/۸۵ و نتایج آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. ابتدا اعداد پراتنل 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، $X/W =$ ۰/۷، ۰/۵، ۰/۶۲، ۰/۶۵، ۰/۵) تغییرات عدد پراتنل آشفته (۰/۸۷، ۰/۷۷، ۰/۷، ۰/۵، ۰/۵) قرار می‌گیرند. در نهایت و با بررسی نتایج مشخص شد که عدد پراتنل آشفته میانگین برابر با ۰/۶۵ بوده و مورد استفاده قرار می‌گیرد.



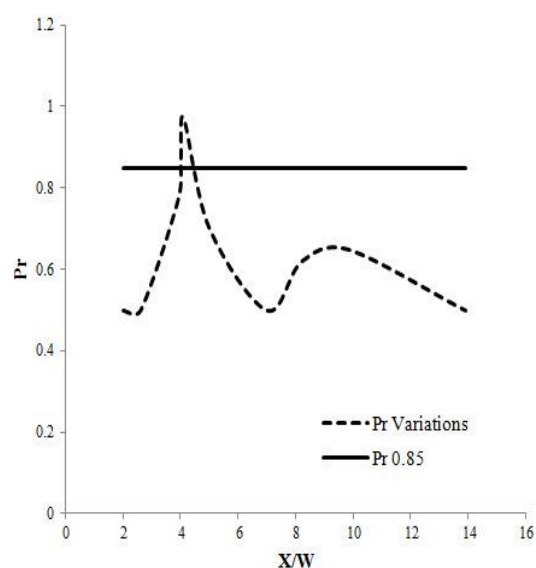
شکل ۱۲: تغییرات عدد پراتنل موثر در رینولدز ۵۲۰۰

احساس نشد. همچنین تغییرات عدد ناسلت با تغییر عدد پراتنل آشفته در رینولدز ۵۲۰۰ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش عدد پراتنل 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 پراتنل تغییر می‌کند. در ادامه تغییرات عدد پراتنل موثر در شش قسمت مساوی در محدوده‌ی محاسباتی جت شیاری برخوردی و در سه عدد رینولدز مختلف بررسی شد. داده‌های فلونت نشان دادند که در هر سه عدد رینولدز مختلف، عدد پراتنل موثر از ۰/۷۴ تا ۰/۸۴ تغییر می‌کند. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که فرض ثابت بودن عدد پراتنل 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 پراتنل آشفته‌گی، $Pr_t = C_{pu} / \lambda$
Re	رینولدز
k	انرژی جنبشی آشفته‌گی، m^2/s^2
G	تولید انرژی جنبشی آشفته‌گی
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 پراتنل آشفته‌گی



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

۶- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر به بررسی استفاده از جت شیاری برخوردی در حالت آشفته و تاثیر عدد پراتنل آشفته و عدد رینولدز بمنظور افزایش انتقال حرارت پرداخته شد. برای بررسی، سیال هوا در نظر گرفته شده و از مدل آشفته‌گی 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 400×75 تغییرات چشم‌گیری در عدد ناسلت رخ نمی‌دهد. به همین علت از شبکه‌بندی 400×75 در ادامه‌ی تحقیق حاضر استفاده شده است. عدد پراتنل آشفته در جریان‌های مهندسی معمولاً ثابت و برابر ۰/۸۵ در نظر گرفته می‌شود. در ادامه، بررسی عدد پراتنل آشفته ۰/۸۵ و نتایج آزمایشگاهی ون-هاینینگن [۱۰] و همچنین اعداد دیگر پراتنل آشفته‌گی نشان داد که روی نقاط آزمایشگاهی مختلف عدد پراتنل آشفته تغییر می‌کند. علاوه بر این نتایج بدست آمده در تحقیق حاضر نشان می‌دهند که فرض ثابت بودن عدد پراتنل 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 پراتنل 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 بعلا افزایش سرعت برخورد جت با سطح و افزایش دبی سیال خنک می‌باشد. همچنین افزایش عدد رینولدز منجر به افزایش عدد پراتنل آشفته در نواحی نزدیک دیواره شده ولی با افزایش فاصله از دیواره، تاثیر محسوسی در مقدار پراتنل آشفته

[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.

λ هدایت حرارتی

μ ویسکوزیته دینامیکی، kg / m.s

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 Structural 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).