



مطالعه عددی انتقال حرارت جابجایی طبیعی دیاکسید کربن فوق بحرانی در لوله عمودی با استفاده از معادله حالت چند پارامتری اسپن و وگنر

شهروز اomidوار اوغانی^۱، علیرضا تیمورتاش^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، تبدیل انرژی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

۲- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

*مشهد، صندوق پستی ۹۱۷۷۵-۱۱۱۱ teymourtash@um.ac.ir

چکیده

سیال فوق بحرانی به دلیل دارا بودن خصوصیات منحصر به فرد سال هاست که در برخی از صنایع به منظور افزایش کارایی فرآیندها جایگزین سیال غیر بحرانی شده و از زمان شناختن مورد مطالعات آزمایشگاهی، عددی و تحلیلی متعددی قرار گرفته است. در این پژوهش فرآیند انتقال حرارت جابجایی طبیعی آرام بین لوله داغ دما ثابت عمودی و دیاکسید کربن فوق بحرانی به طور عددی شبیه سازی شده است. مدل سازی این فرآیند به صورت دوبعدی شبیه گذرا و با استفاده از روش حجم محصور انجام گرفته است. هدف اصلی پژوهش بررسی اثر تغییرات خواص سیال فوق بحرانی نزدیک دمای شبیه بحرانی آن بر میزان سرعت و دمای سیال در انتقال حرارت جابجایی طبیعی و درنهایت تأثیر این تغییرات بر میزان کل انتقال حرارت صورت گرفته به سیال نسبت به حالت غیر بحرانی است. مدل سازی فرآیند انتقال حرارت بین دمایهای 305 تا 312 کلوین و فشارهای 7.5 تا 9 مگا پاسکال انجام شده است. در این تحقیق به منظور محاسبه خواص دیاکسید کربن در شرایط مختلف برای اولین بار از معادله حالت چند پارامتری اسپن و وگنر بر حسب انرژی هلمهولتز به طور مستقیم استفاده شده است. نتایج به دست آمده نشان دهنده افزایش نزدیکی انتقال حرارت جابجایی آزاد به دیاکسید کربن در حالت فوق بحرانی نسبت به فرض گاز ایده آل تا ۱۶۰٪ در نزدیکی نقطه شبیه بحرانی و در دیگر نقاط افزایش تا ۱۱۸٪ است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۶ تیر ۱۳۹۵

پذیرش: ۱۰ مهر ۱۳۹۵

ارائه در سایت: ۰۵ آبان ۱۳۹۵

کلید واژگان:

سیال فوق بحرانی

جابجایی طبیعی

لوموی عمودی

روش حجم محصور

عدد ناسلت

Numerical study of natural convection heat transfer to supercritical carbon dioxide in a vertical tube using Span and Wagner multi-parameter equation of state

Shahrouz Omidvar Oghani, Alireza Teymourtash*

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran
* P.O.B. 91775-1111, Mashhad, Iran, teymourtash@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 16 July 2016

Accepted 01 October 2016

Available Online 26 October 2016

Keywords:

Supercritical Fluid

Natural Convection

Vertical Tube

Finite Volume

Nusselt Number

ABSTRACT

Supercritical fluids have substituted non-super critical fluids in some areas of industry because of their unique characteristics and have been the subject of numerous experimental, numerical and analytic studies since their discovery. In this study laminar natural convection between a hot vertical tube with constant temperature and supercritical carbon dioxide with uniform temperature at inlet is simulated by utilizing a numerical model. The simulation is a two-dimensional, pseudo-transient numerical model based on finite volume method. The main objective of this study is to investigate and analyze the effect of severe property variations of supercritical carbon dioxide on the flow and temperature field of natural convection that ultimately affect heat transfer rates with respect to non-critical natural convection. Numerical simulations have been carried out for temperature and pressure ranges of 305K to 312K and 7.5MPa to 9MPa respectively. Span and Wagner's multi-parameter equation of state have been used directly to determine carbon dioxide properties around pseudo critical temperature for the first time. Results indicate an increased rate of total heat transfer up to 160% near pseudo-critical temperature and 118% in other temperatures for supercritical natural convection with respect to ideal gas assumption.

۱- مقدمه

منحصر به فرد دیگر آن‌ها تغییرات سریع خواص در نزدیکی دمای شبیه بحرانی در ازای تغییرات کوچک دما است [3]: که موجب می‌شود خواص سیال فوق بحرانی برای فرآیندهای مختلف با کنترل دما قابل تنظیم باشند. در بین سیالات فوق بحرانی، دیاکسید کربن به دلیل در دسترس بودن، هزینه کم، دمای بحرانی پایین، غیر سمی و غیرقابل اشتعال بودن از پرکاربردترین سیالات فوق بحرانی است.

سیالات فوق بحرانی در صنایع غذایی، دارویی، پلیمر و پلاستیک، شیمیایی، تبرید، آرایشی-بهداشتی و مواد مورد استفاده قرار می‌گیرند و چند دهه است که به طور گسترده مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌اند [2,1]. این سیالات خواصی منتخب از بین خواص گاز و مایع را دارند؛ به عنوان مثال می‌توان به حلالیت بالا برخلاف ویسکوزیته پایین اشاره داشت. خصوصیت

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Sh. Omidvar Oghani, A. Teymourtash, Numerical study of natural convection heat transfer to supercritical carbon dioxide in a vertical tube using Span and Wagner multi-parameter equation of state, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 11, pp. 69-80, 2016 (in Persian)

عمودی با دیواره دما ثابت (T_{in}) می‌باشد که در شکل ۱ به همراه دستگاه مختصات استفاده شده و یکی از حجم‌های کنترلی (با هاشور) ترسیم شده است. هندسه مسئله دارای تقارن محوری است و نسبت طول لوله به قطر آن به مقدار کافی بزرگ در نظر گرفته شده است ($L/D \geq 30$).¹ جریان آرام و پایا برای یک سیال نیوتونی و تراکم ناپذیر با خواص متغیر فرض شده است. تغییرات شدید خواص در دمای شبه بحرانی حل عددی پایا مسئله در نزدیکی این دما را ناپایدار می‌کند؛ به جهت رفع این مشکل و افزایش پایداری حل عددی از روش شبه-ناپایا² استفاده شده است. بقای جرم، مومنتوم و انرژی معادلات حاکم بر مسئله هستند که به ترتیب در روابط (۱) تا (۳) نوشته شده‌اند.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{u}) + (\vec{u} \cdot \nabla) \rho \vec{u} = -\nabla p + \nabla(\mu \nabla \cdot \vec{u}) - \rho \vec{g} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h) + (\vec{u} \cdot \nabla) \rho h = \nabla \cdot (k \nabla T) \quad (3)$$

در روابط بالا \vec{u} بردار سرعت و h آنتالپی سیال هستند. خواص سیال از جمله ویسکوزیته (μ)، ضریب رسانش هدایتی (k)، چگالی (ρ) و آنتالپی به دما و فشار بستگی دارند و نحوه محاسبه آن‌ها در ادامه ذکر شده است. عدد رایلی تغییریافته (Ra^*)، ناسلت متوسط (Nu_{ave})، ناسلت محلی (Nu_y) و دمای شبه کاهش‌یافته از پارامترهای مهم این مسئله هستند؛ که در روابط (۴) تا (۷) بر اساس مقدار خواص بر روی دیوار لوله تعریف شده‌اند [۱۲].

$$Ra^* = \frac{R C_p R^3 g \rho_w^2 \beta (T_w - T_{in})}{\mu_w k_w} \quad (4)$$

$$Nu_{ave} = \left(\frac{\frac{q}{A_p}}{T_w - T_{in}} \right) \frac{D}{k_w} \quad (5)$$

$$Nu_y = \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_y \frac{D}{k_w} \quad (6)$$

$$T_{pr} = \frac{T}{T_{pc}} \quad (7)$$

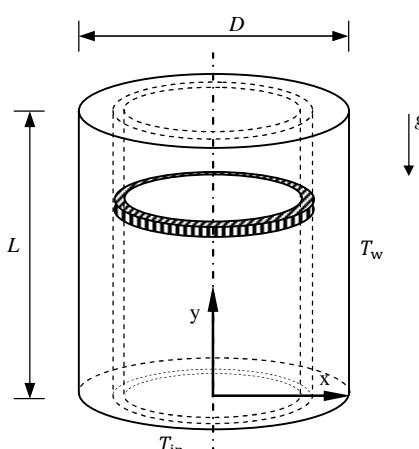


Fig. 1 Problem geometry and utilized control volume

شکل ۱ هندسه مسئله و حجم کنترلی استفاده شده

¹ Pseudo-transient

ضرورت مطالعه فرآیند جابجایی طبیعی از مشاهده آن در زمینه‌های مختلف صنعت از جمله فرآیند تولید اسانس، خنک کاری قطعات الکترونیکی، تبرید، مبدل‌های حرارتی و سیستم‌های زمین‌گرمایی است؛ به همین منظور انتقال حرارت جابجایی در سیالات فوق بحرانی از دده شست میلادی تاکنون به منظور افزایش بازده فرایند انتقال حرارت جابجایی مورد تحقیق و مطالعه قرار گرفته است [۶-۴].

وی و همکاران انتقال حرارت جابجایی آزاد و آرام از یک ذره کروی به آب فوق بحرانی را به طور عددی شبیه‌سازی کرده‌اند. در این تحقیق از دو مدل برای شبیه‌سازی استفاده شده است؛ مدل بوزینسک¹ با خواص ثابت و مدل واقعی که در آن تمام خواص متغیر هستند و معادله انرژی بر حسب آنتالپی نوشته شده است. نتایج به دست آمده از این شبیه‌سازی نشان می‌دهند که مدل واقعی نسبت به مدل بوزینسک نتایج بهتری ارائه می‌دهد [۷].

تیمورتاش و ورکیانی انتقال حرارت جابجایی آزاد به دیاکسید کربن و بوتان فوق بحرانی از یک صفحه عمودی را شبیه‌سازی کرده‌اند. برای محاسبه خواص سیال از معادله حالت وندروالس² استفاده و ضریب انبساط پذیری بر حسب تابعی از دما، فشار، ثابت‌های وندروالس و ضریب تراکم پذیری تعریف شده است. این مطالعه علاوه بر افزایش انتقال حرارت در حالت فوق بحرانی، نشان می‌دهد که تغییرات دمای دیواره با شبیه‌سازی و مثبت باعث افزایش بیشتر انتقال حرارت و شبیه‌منفی باعث کاهش آن می‌شود [۹,۸].

تیمورتاش و همکاران انتقال حرارت جابجایی آزاد به دیاکسید کربن و آب فوق بحرانی از صفحه‌ی عمودی با شار گرمایی ثابت را مورد مطالعه قرار داده‌اند. در این شبیه‌سازی ضریب انبساط حجمی سیال با استفاده از معادله حالت ردیلش-وانگ³ به صورت تابعی از دما، فشار و ضریب تراکم پذیری بیان شده که نسبت معادله حالت وندروالس دقیق‌تر است. مطالعات انجام شده علاوه بر بهبود انتقال حرارت در حالت فوق بحرانی نشان دهنده افزایش انتقال حرارت از دیواره تحت شار گرمایی با شبیه‌سازی و مثبت تابعی کاهش آن تحت شار گرمایی با شبیه‌منفی است [۱۰].

تیمورتاش و نوری فرد انتقال حرارت جابجایی طبیعی سیال فوق بحرانی را در کانال عمودی دما ثابت با بهره‌گیری از معادله حالت ردیلش-وانگ شبیه‌سازی کرده‌اند و گزارش شده است که ضریب انتقال حرارت در حالت فوق بحرانی نسبت به گاز ایده آل افزایش قابل توجهی دارد. بررسی اثرات تغییرات دما و فشار بر ضریب انتقال حرارت، نشان داده که تغییرات فشار نسبت به تغییرات دما بر ضریب انتقال حرارت تأثیر کمتری می‌گذارد [۱۱].

در این تحقیق برخلاف تحقیقات دیگر شبیه‌سازی در دمای شبه بحرانی انجام گرفته است. ابتدا به بررسی تغییرات خواص سیال در دیاکسید کربن در دمای شبه بحرانی آن و سپس تأثیر این تغییرات بر میدان سرعت و دمای سیال در انتقال حرارت جابجایی آزاد از یک لوله داغ عمودی به دیاکسید کربن در جوار دمای شبه بحرانی و درنهایت به برآورد کل انتقال حرارت صورت گرفته در مقایسه با حالت فرض گاز ایده آل پرداخته شده است؛ در این ارتباط خواص دیاکسید کربن در حالات مختلف و نزدیک به نقطه بحرانی برای اولین بار به طور مستقیم توسط معادلات حالت چند پارامتری اسپن و وگنر محاسبه شده‌اند.

2- معادلات حاکم

هندسه‌ای که معادلات حاکم بر این پدیده در آن حل شده است، یک لوله

¹ Boussinesq

² Van der Waals

³ Redlich-Kwong

2-3- شرط مرزی خروجی

در خروجی میدان جریان و دمای توسعه یافته فرض شده‌اند. در رابطه (9) شرط مرزی خروجی مرتبط با توسعه یافته قابل مشاهده است.

$$\begin{cases} u(x, L) = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial y}(x, L) = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial y}(x, L) = 0 \\ p(x, L) = p_{stag} \end{cases} \quad (9)$$

3- شرط مرزی دیواره لوله

طبق رابطه (10) (10) روی دیواره لوله شرط مرزی عدم لغزش و دمای ثابت در نظر گرفته شده است.

$$\begin{cases} u(R, y) = 0 \\ v(R, y) = 0 \\ T(R, y) = T_w \end{cases} \quad (10)$$

4- شرط مرزی تقارن محوری

شرط مرزی اعمال شده برای مرکز لوله بر اساس تقارن محوری هندسه، در رابطه (11) (11) ارائه شده است.

$$\begin{cases} u(0, y) = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial x}(0, y) = 0 \\ \frac{\partial T}{\partial x}(0, y) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

4- خواص دیاکسید کربن فوق بحرانی

در این شبیه‌سازی دیاکسید کربن به عنوان سیال فوق بحرانی انتخاب شده است. این سیال به دلیل فشار و دمای بحرانی نسبتاً پایین، قابل دسترسی بودن، غیر سمی و غیرقابل اشتعال بودن در فرآیندهای صنعتی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در جدول 1 دما و فشار بحرانی چند سیال قابل مشاهده است.

4- معادله حالت

معادلات حالت مکعبی (وندروالس، ردیش-وانگ و ...) در همسایگی دمای شبه بحرانی دقت کافی ندارند [15]. از آنجاکه هدف این تحقیق شبیه‌سازی جابجایی طبیعی در دمای شبه بحرانی سیال است، استفاده از معادلات حالت مکعبی میسر نیست؛ درنتیجه برای محاسبه خواص ترمودینامیکی دیاکسید کربن فوق بحرانی از معادله حالت چند پارامتری⁸ اسپن و وگنر استفاده شده است [16].

جدول 1 دما و فشار بحرانی چند سیال

Table 1 Critical Properties of Various Fluids

(K)	دمای بحرانی (MPa)	سیال
647.1	22.06	آب
304.1	7.38	دیاکسید کربن
190.4	4.60	متان
305.3	4.87	اتان
512.6	8.09	متانول
405.5	11.35	آمونیاک

⁸ Multi-parameter equation of state

معادلات حاکم بر مسئله با استفاده از روش حجم محدود تفاضلی شده‌اند که در آن برای جداسازی جملات جابجایی¹ از روش ترکیبی درجه دو² استفاده شده است؛ در این روش بر اساس عدد پکلت از روش مرکزی³ کوئیک⁴ یا بالادست درجه دوم⁵ استفاده می‌شود [13] و برای ارتباط بین میدان فشار و سرعت الگوریتم پیزو⁶ به کار گرفته شده است. به جهت حل معادلات تفاضلی حاصل شده، با استفاده از زبان برنامه‌نویسی فرتون⁷ برنامه‌ای برای پیاده‌سازی الگوریتم‌ها و محاسبات معادله حالت، تدوین و استفاده شده است.

حوزه حل با توجه به شکل 2 به حلقه‌های هم‌مرکز تقسیم و شبکه‌بندی شده است و بهمنظور افزایش دقت نتایج، شبکه‌بندی در ناحیه‌هایی با تغییرات بزرگ ریزتر می‌باشد؛ یعنی در ناحیه ورودی و نزدیکی دیوارها ضخامت حجم‌های کنترلی از بالادست و مرکز جریان کمتر است. شبکه استفاده شده برای حل عددی در شکل 2 رسم شده است و در آن انقباض شبکه در راستای شعاعی مشاهده می‌شود؛ اما انقباض در راستای محوری، به دلیل تعداد بالای گره‌ها و طول لوله در این شکل محسوس نیست.

3- شرایط مرزی

دزربو و همکاران درباره شرایط مرزی انتقال حرارت جابجایی به‌طور مفصل تحقیق و بحث نموده‌اند [14]. در این پژوهش از شرایط مرزی توصیه شده در این مرجع استفاده شده است.

3- شرط مرزی ورودی

شرایط مرزی ورودی در رابطه (8) قابل مشاهده هستند. فرض شده که سیال در دوردست دارای فشار معلوم p_{stag} ، بی‌حرکت و غیر ویسکوز است؛ همچنین دمای سیال در ورودی ثابت و برابر T_{in} است.

$$\begin{cases} u(x, 0) = 0 \\ \frac{\partial v}{\partial y}(x, 0) = 0 \\ T(x, 0) = T_{in} \\ p(x, 0) = p_{stag} - \frac{1}{2}\rho(v(x, 0))^2 \end{cases} \quad (8)$$

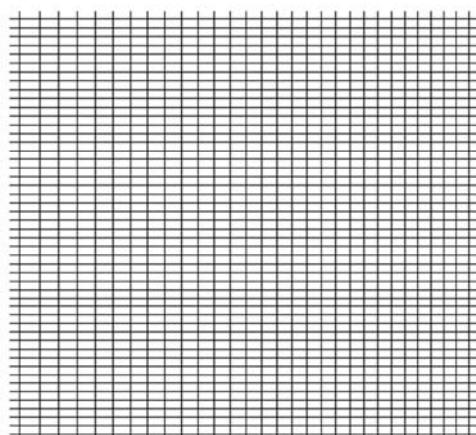


Fig. 2 Solution grid at inlet and tube wall

شکل 2 شبکه حل در ورودی و دیوار لوله

¹ Convective terms

² Second order hybrid scheme

³ Central differencing scheme

⁴ Quick

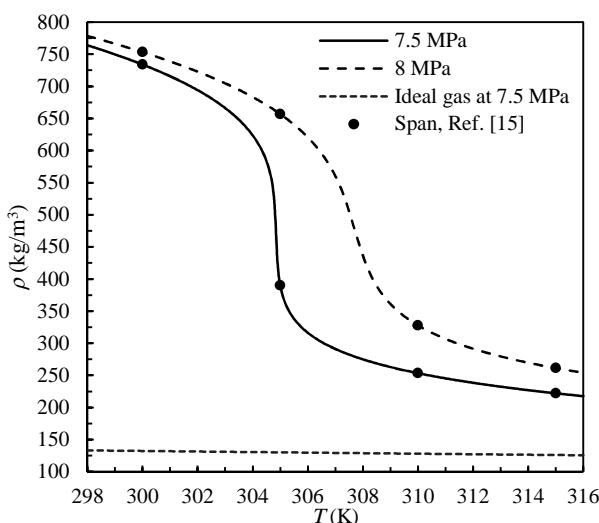
⁵ Second order upwind scheme

⁶ PISO

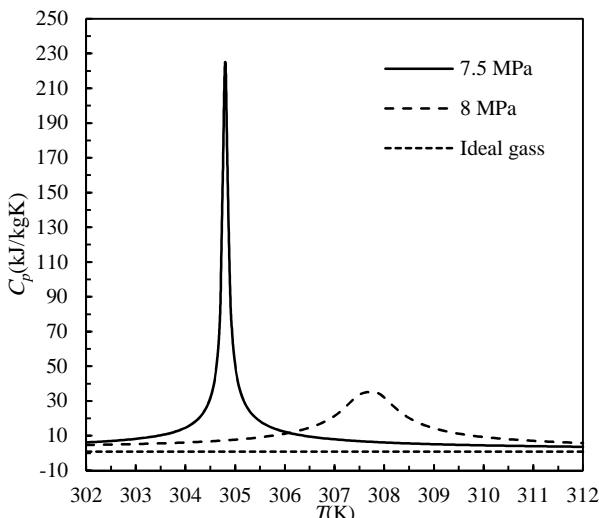
⁷ FORTRAN 95

ترمودینامیکی سیال در مراجع [17,16] ارائه شده‌اند. در این مدل ترمودینامیکی خواص ماده بر حسب دما و چگالی ماده تعریف شده‌اند؛ در حالی که در حل عددی میدان جریان، مقادیر دما و فشار معلوم و چگالی مجهول است. برای محاسبه چگالی با داشتن فشار و دما نیاز به یک روش تکراری³ است؛ در این راستا روش تکراری نابجایی⁴ به کار گرفته شده است. برای شروع روش‌های تکراری نیاز به حدس اولیه است؛ برای این منظور از معادله حالت مکعبی سوو⁵، رابطه‌ای اصلاح شده بر اساس معادله حالت ردیلش-وانگ، استفاده شده است.

نتایج بدست‌آمده در این تحقیق پس از انجام محاسبات لازم از معادله حالت، در شکل‌های 3 تا 5 قابل مشاهده هستند. برخی از خواص سیال در دمای شبه بحرانی به مقدار بیشینه خود می‌رسند و بقیه خواص در حوالی این دما دچار تغییرات شدید می‌شوند. درواقع دمای شبه بحرانی دمایی است که در یک فشار معین، مقدار ظرفیت گرمایی ویژه به مقدار بیشینه خود می‌رسد.



شکل 3 چگالی محاسبه شده برای دیاکسید کربن فوق بحرانی



شکل 4 ظرفیت گرمایی فشار ثابت محاسبه شده برای دیاکسید کربن فوق بحرانی

معادله حالت مذکور با برازش بر نتایج هزار و پانصد داده آزمایشگاهی و استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی ریاضی، انرژی آزاد هلمهولتز¹ را بر حسب چگالی و دما به طور صریح محاسبه می‌کند. با مشتق‌گیری از این رابطه می‌توان خواص ترمودینامیکی دیاکسید کربن را با دقت بسیار بالا به دست آورد. معادلات حالت چند پارامتری معادلات حالتی هستند که از جملات بیشتری نسبت به معادلات حالت رایج تشکیل شده‌اند؛ این معادلات معمولاً انرژی هلمهولتز یا فشار را به صورت تابعی از دما و چگالی تعریف می‌کنند. با مشتق‌گیری از انرژی هلمهولتز نسبت به دما و چگالی می‌توان دیگر خواص ترمودینامیکی سیال را محاسبه کرد و برخلاف مواردی که معادله نسبت به فشار صریح است، نیاز به عملگر انتگرال نیست. این شرط که توابع بیان شده بر حسب فشار باید قابل انتگرال گیری باشند، شکل تابع را به شدت محدود می‌کند و اجازه تعریف و تدوین معادلات حالت دقیق را نمی‌دهد.

معادلات حالت بر پایه انرژی هلمهولتز از دو بخش ایده آل و مانده² تشکیل می‌شوند. بخش ایده آل (a^0) فرض می‌کند مولکول‌ها به صورت نقطه‌های دارای جرم هستند؛ یعنی فضایی اشغال نمی‌کنند و تنها راه ذخیره انرژی توسط آن‌ها حرکت انتقالی، چرخشی و نوسان است؛ همچنین مولکول‌ها با یکدیگر تعاملی جز برخورد الاستیک ندارند. بقیه رفتارها و تعامل‌های باقیمانده مولکول‌ها در قسمت مانده (a^r) در نظر گرفته می‌شوند. برخلاف مدل‌های ارائه شده برای گاز ایده آل، مدل‌های بخش مانده با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی ندارند؛ به همین دلیل معادلات دقیق ارائه شده برای بخش مانده روابط تجربی هستند. اسین و وگر برای قسمت ایده آل و مانده معادله حالت دیاکسید کربن روابط (12) تا (16) را ارائه کرده‌اند.

$$\alpha^0 = \ln \delta + a_1^0 + a_2^0 \tau + a_3^0 \ln \tau + \sum_{i=4}^8 a_i^0 \ln(1 - e^{-\theta_i^0 \tau}) \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \alpha^r = & \sum_{i=1}^7 n_i \delta^{d_i} \tau^{t_i} + \sum_{i=8}^{34} n_i \delta^{d_i} \tau^{t_i} e^{-\delta c_i} \\ & + \sum_{i=35}^{39} n_i \delta^{d_i} \tau^{t_i} e^{-\alpha_i(\delta - \epsilon_i)^2 - \beta_i(\tau - \gamma_i)^2} + \sum_{i=40}^{42} n_i \Delta^{b_i} \delta \Psi \end{aligned} \quad (13)$$

$$\Delta = \theta^2 + B_i[(\delta - 1)^2]^{\alpha_i} \quad (14)$$

$$\theta = (1 - \tau) + A_i[(\delta - 1)^2]^{1/(2\beta_i)^2} \quad (15)$$

$$\Psi = e^{-C_i(\delta - 1)^2 - D_i(\tau - 1)^2} \quad (16)$$

در روابط بالا α انرژی هلمهولتز کاهش یافته است که به همراه مقادیر τ و δ در روابط (17) تا (19) معرفی شده‌اند و بقیه پارامترها ضرایبی هستند که در جداول مرجع [16] تعریف شده‌اند.

$$\alpha(\tau, \delta) = \frac{a(T, \rho)}{RT} \quad (17)$$

$$\tau = \frac{T_c}{T} \quad (18)$$

$$\delta = \frac{\rho}{\rho_c} \quad (19)$$

برای محاسبه خواص ترمودینامیکی از معادله حالت، نیاز به مشتق‌گیری از آن بر حسب τ و δ است. جزئیات مربوط به مشتق‌ها و رابطه آن‌ها با خواص

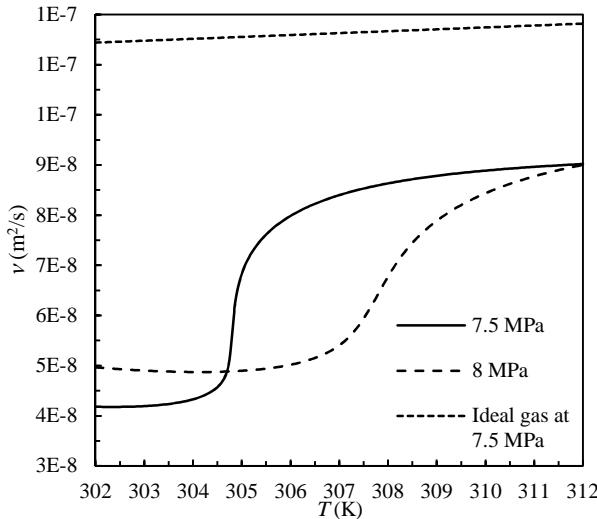
³ iterative

⁴ Regula falsi

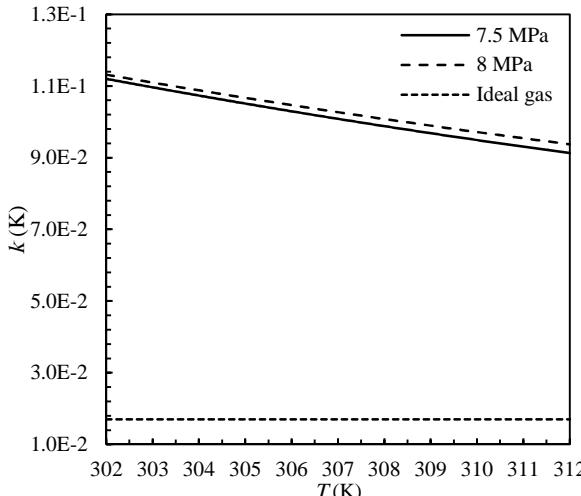
⁵ Soave

¹ Helmholtz free energy

² Residual



شکل ۶ ویسکوزیته سینماتیکی محاسبه شده برای دیاکسید کربن فوق بحرانی



شکل ۷ ضریب رسانش گرمایی محاسبه شده برای دیاکسید کربن فوق بحرانی

۵- نتایج

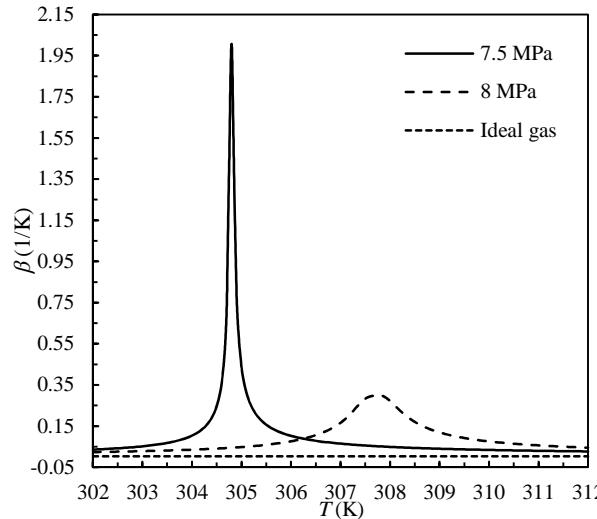
۵-۱- استقلال نتایج از شبکه

برای بررسی عدم وابستگی نتایج به تعداد گره‌های شبکه، شبیه‌سازی با استفاده از چندین شبکه مختلف انجام شده است. با توجه به جدول ۲ از شبکه ۳۰۰۰×۵۰۰ برای حل عددی معادلات حاکم استفاده شده است؛ زیرا در این بازه نتایج به تعداد گره‌های استفاده شده وابسته نیستند.

جدول ۲ بررسی استقلال نتایج از شبکه

Table 2 Grid independence analysis

شبکه	نسلت محلی در یک نقطه دلخواه
30 × 2000	5.2954
30 × 3000	5.4216
40 × 3000	5.4594
60 × 3000	5.4619
35 × 4000	5.4483
45 × 4000	5.4584



شکل ۵ ضریب انبساط پذیری حرارتی محاسبه شده دیاکسید کربن فوق بحرانی

در این شکل‌ها خواص دیاکسید کربن فوق بحرانی با فرض گاز ایده آل برای این سیال مقایسه شده‌اند؛ تفاوت اول، اختلاف مقدار متوسط خواص تحت این دو فرض و تفاوت دوم، عدم حساسیت فرض گاز ایده آل به دمای شبکه بحرانی در برابر تغییرات شدید خواص به دست آمده از معادله حالت اسپن و وگنر در این دما است.

۴-۲- ویسکوزیته

حیدریان و همکاران با استفاده از نتایج آزمایشگاهی خود و دیگر نتایج آزمایشگاهی در دسترس رابطه (20) را برای پیش‌بینی ویسکوزیته دیاکسید کربن در ناحیه فوق بحرانی ارائه داده‌اند [18]. نتایج حاصل از این رابطه در شکل ۶ ارائه شده‌اند.

$$\mu = \frac{A_1 + A_2 p + A_3 p^2 + A_4 \ln(T) + A_5 (\ln(T))^2 + A_6 (\ln(T))^3}{1 + A_7 + A_8 \ln(T) + A_9 (\ln(T))^2} \quad (20)$$

در رابطه فوق، فشار بر حسب بار، دما بر حسب کلوین و واحد ویسکوزیته سانتی پویز است. ضرایب A_1 تا A_9 نیز در مرجع [18] ارائه شده‌اند.

۴-۳- ضریب رسانش گرمایی

جراحیان و حیدریان رابطه (21) را بر اساس 668 داده آزمایشگاهی برای محاسبه ضریب رسانش گرمایی دیاکسید کربن فوق بحرانی ارائه کردند [19].

$$k = \frac{B_1 + B_2 p + B_3 p^2 + B_4 \ln(T) + B_5 (\ln(T))^2 + B_6 (\ln(T))^3}{1 + B_6 p + B_7 \ln(T) + B_8 (\ln(T))^2 + B_9 (\ln(T))^3} \quad (21)$$

که در آن فشار بر حسب MPa، دما بر حسب K و واحد ضریب رسانش حرارتی $\text{mWm}^{-1}\text{K}^{-1}$ است. ضرایب B_1 تا B_9 در مرجع [19] ارائه شده‌اند. نتایج به دست آمده از این رابطه در شکل ۷ ترسیم شده‌اند. برخلاف دیگر خواص، ضریب رسانش گرمایی و ویسکوزیته دینامیکی در نزدیکی دمای شبکه بحرانی دچار تغییرات شدید نمی‌شوند؛ ولی ویسکوزیته سینماتیکی به دلیل وابسته بودن به مقدار چگالی، در حوالی دمای شبکه بحرانی افزایش پیدا می‌کند.

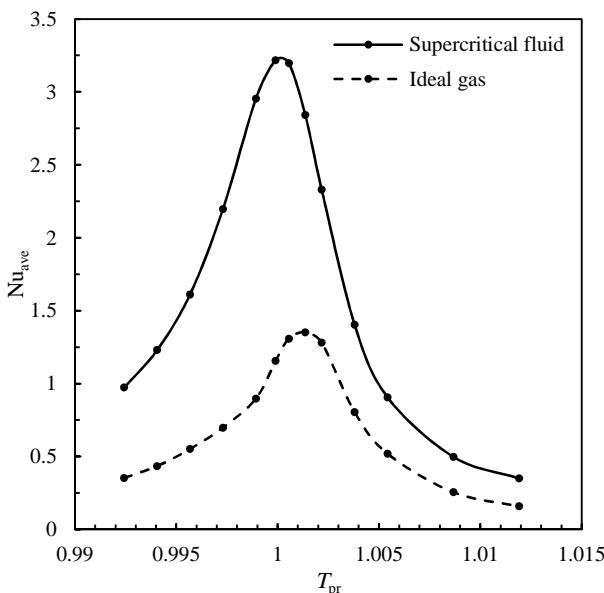


Fig. 9 Nusselt numbers for a tube of 0.2mm diameter and temperature difference of 1 degree at 8MPa

شکل 9 اعداد ناسلت به دست آمده برای لوله به قطر 0.2 میلی متر و 1 درجه اختلاف دما در فشار 8MPa

برای تعیین میزان انتقال حرارت در گاز ایده‌آل ابتدا عدد رایلی تغییریافته در حالت فوق بحرانی متناظر با آن دما محاسبه و سپس عدد ناسلت برای گاز ایده‌آل با درون‌یابی از نتایج شکل 8 به دست آمده است. همچنین لازم به ذکر است که دمای شبکه کاهش‌یافته بر اساس T_{avg} برابر با میانگین دمای ورودی و دیواره لوله، تعریف شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که میزان انتقال حرارت سیال فوق بحرانی نسبت به گاز ایده‌آل با Ra^* برابر، بیشتر است و میزان آن در نزدیکی دمای شبکه بحرانی (307.83K) بیشینه می‌شود. نتایج به دست آمده برای لوله با قطر بزرگ‌تر (0.4 میلی متر) در شکل‌های 10 تا 12 رسم شده‌اند.

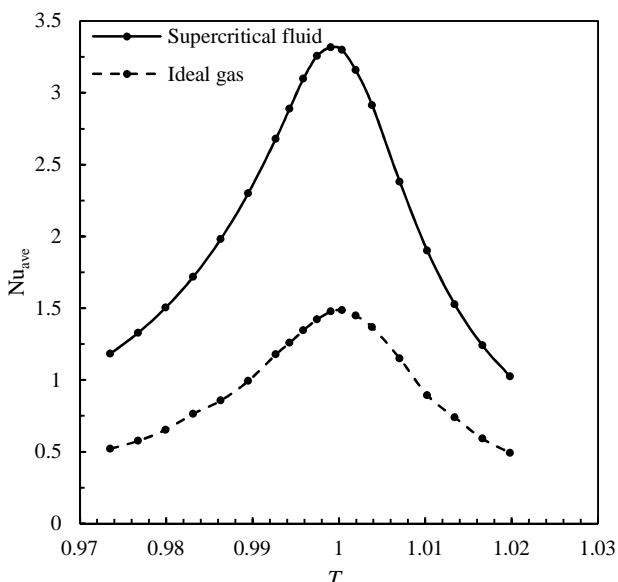


Fig. 10 Nusselt numbers for a tube of 0.4mm diameter and temperature difference of 1 degree at 9MPa

شکل 10 اعداد ناسلت به دست آمده برای لوله با قطر 0.4 میلی متر و 1 درجه اختلاف دما در فشار 9MPa

5-2- استقلال نتایج از نسبت طول به قطر لوله

جدول 3 حاوی نتایج به دست آمده برای سه حالت مختلف با عدد رایلی تغییریافته یکسان و نسبت طول به قطر متفاوت است؛ با توجه با این جدول مشاهده می‌شود که جواب‌های به دست آمده برای نسبت طول به قطر 30 از این نسبت مستقل هستند.

5-3- اعتبار سنجی نتایج

به منظور بررسی صحت نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی انجام شده، این شبیه‌سازی برای مسئله انتقال حرارت جابجایی آزاد در حالت غیر بحرانی در لوله عمودی انجام شده است. انطباق نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی با نتایج ارائه شده توسعه النیاس در شکل 8 نشان داده شده و بیانگر اعتبار نتایج این شبیه‌سازی است.

5-4- نتایج در لوله عمودی

برای مقایسه انتقال حرارت جابجایی طبیعی در سیال فوق بحرانی با سیال غیر بحرانی، نمودار میزان انتقال حرارت بر اساس عدد ناسلت برای دیاکسید کربن غیر بحرانی با فرض گاز ایده‌آل و دیاکسید کربن فوق بحرانی در نزدیکی دمای شبکه بحرانی سیال در شکل 9 رسم شده است.

جدول 3 بررسی استقلال نتایج از نسبت طول به قطر لوله

Table 3 Aspect ratio independence analysis

نسبت طول به قطر	ناسلت متوسط
10	6.984
20	6.559
30	6.510
40	6.485
50	6.476
60	6.493
80	6.505

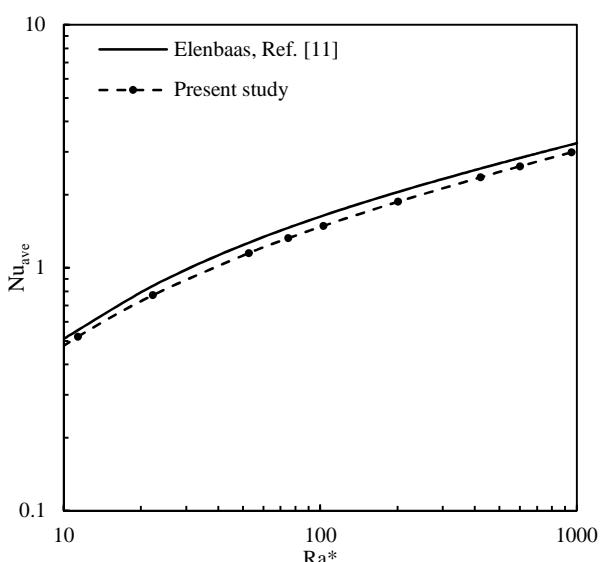


Fig. 8 Comparison of numerical and semi-empirical results inside a tube [12]

شکل 8 مقایسه نتایج عددی به دست آمده با روابط نیمه تجربی النیاس در لوله عمودی [12]

یکسان نسبت به فشارهای دیگر می‌شود. نکته قابل توجه دیگر کاهش عدد ناسلت بیشینه با افزایش فشار می‌باشد. این اتفاق حاصل اثر فشار بر خواص ترمودینامیکی و همچنین تغییرات ملایمتر این خواص (شکل‌های 3 تا 5) نسبت به دما در فشارهای بالاتر است.

تفاوت روند کلی نمودار عدد ناسلت در شکل 12 به دلیل تزدیک شدن فشار سیال به فشار بحرانی است؛ زیرا با افزایش فشار دمای شبه بحرانی به دمای بحرانی سیال نزدیک می‌شود. به همین دلیل تنها بخش کاهش عدد ناسلت با افزایش دمای متوسط در نمودار مشاهده می‌شود. در شکل‌های 13 تا 15 نتایج بدست‌آمده برای اختلاف دمای بیشتر ارائه شده‌اند.

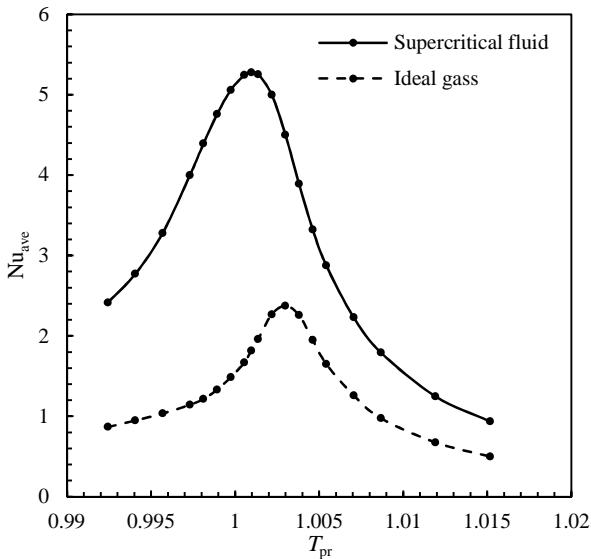


Fig. 13 Calculated Nusselt numbers for a tube of 0.3mm diameter and temperature difference of 2 degrees at 8MPa

شکل 13 اعداد ناسلت بدست‌آمده در تحقیق حاضر برای لوله با قطر 0.3 میلی‌متر و 2 درجه اختلاف دما در فشار 8MPa

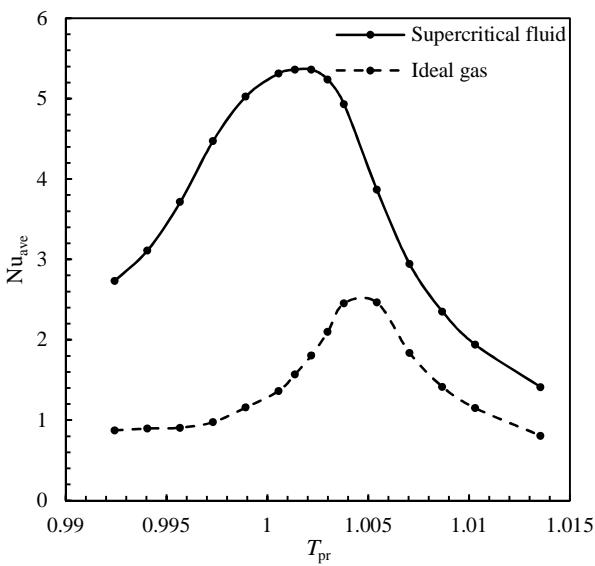


Fig. 14 Calculated Nusselt numbers for a tube of 0.3mm diameter and temperature difference of 3 degree at 8MPa

شکل 14 اعداد ناسلت بدست‌آمده در تحقیق حاضر برای لوله با قطر 0.3 میلی‌متر و 3 درجه اختلاف دما در فشار 8MPa

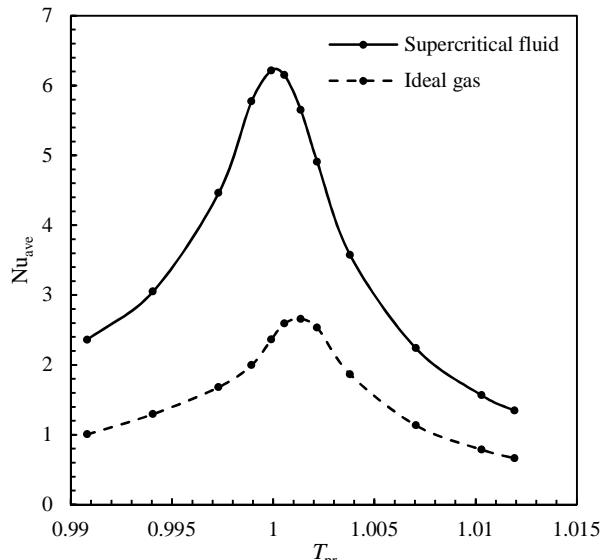


Fig.11 Nusselt numbers for a tube of 0.4mm diameter and temperature difference of 1 degree at 8MPa

شکل 11 اعداد ناسلت بدست‌آمده برای لوله با قطر 0.4 میلی‌متر و 1 درجه اختلاف دما در فشار 8MPa

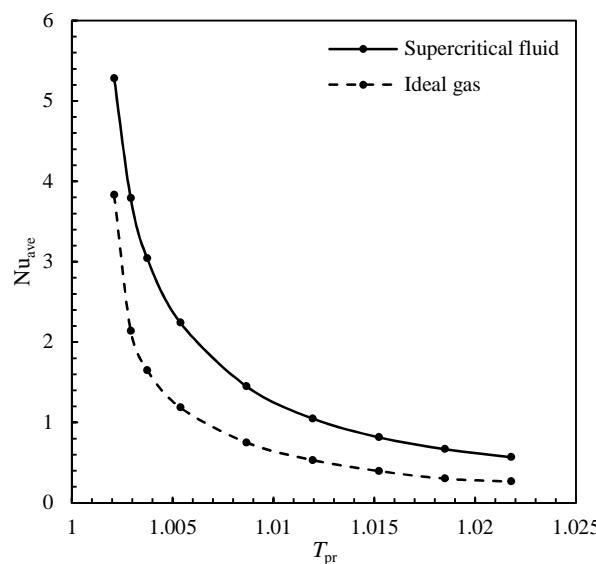


Fig. 12 Nusselt numbers for a tube of 0.4mm diameter and temperature difference of 1 degree at 7.5MPa

شکل 12 اعداد ناسلت بدست‌آمده برای لوله با قطر 0.4 میلی‌متر و 1 درجه اختلاف دما در فشار 7.5MPa

با بررسی شکل‌های 10 تا 12 مشاهده می‌شود که عدد ناسلت همچنان در حوالی دمای شبه بحرانی به بیشترین مقدار خود میرسد. با مقایسه شکل 9 با 11 تأثیر قطر لوله بر فرآیند انتقال حرارت حاصل می‌شود که طبق انتظار با افزایش قطر لوله میزان انتقال حرارت هم افزایش یافته و روند تغییرات منحنی حفظ شده است. در شکل‌های 10 تا 12 قطر و میزان اختلاف دما یکسان ولی فشار متغیر است؛ تأثیر تغییرات فشار بر فرآیند انتقال حرارت جابجایی آزاد سیال فوق بحرانی با مقایسه این شکل‌ها قابل بررسی است. با تغییر فشار به دلیل تغییر دمای شبه بحرانی و تغییر خواص ترمودینامیکی سیال، دمای بیشینه شدن میزان انتقال حرارت برای اختلاف دمای یکسان نیز جابجا می‌گردد که این امر درنهایت منجر به تغییر رفتار سیال در دمای میانگین

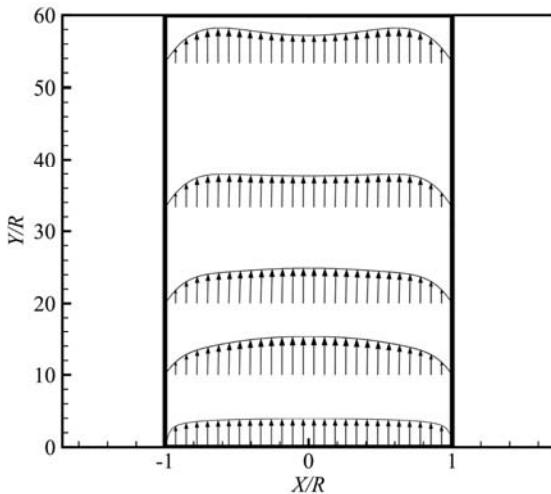


Fig. 16 Velocity profiles obtained from current study in various sections, $\Delta T=1$, $p=8\text{MPa}$, $T_{\text{avg}}=307.5$, $D=0.4\text{mm}$

شکل ۱۶ پروفیل‌های سرعت حاصل از تحقیق حاضر در مقاطع مختلف لوله، $\Delta T=1$
 $p=8\text{MPa}$, $T_{\text{avg}}=307.5$, $D=0.4\text{mm}$

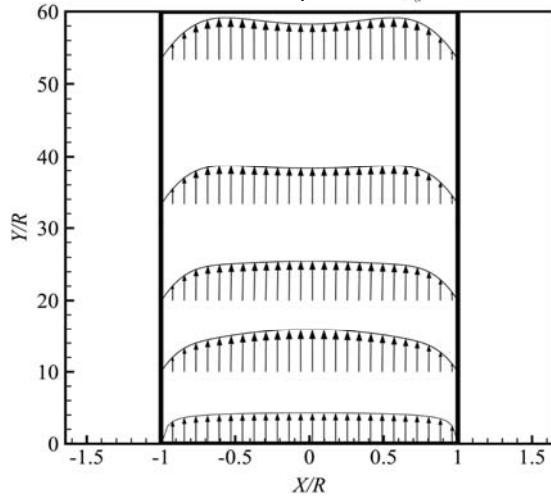


Fig. 17 Velocity profiles obtained from current study in various sections, $\Delta T=2$, $p=8\text{MPa}$, $T_{\text{avg}}=307.75$, $D=0.3\text{mm}$

شکل ۱۷ پروفیل‌های سرعت حاصل از تحقیق حاضر در مقاطع مختلف لوله، $\Delta T=2$
 $p=8\text{MPa}$, $T_{\text{avg}}=307.75$, $D=0.3\text{mm}$

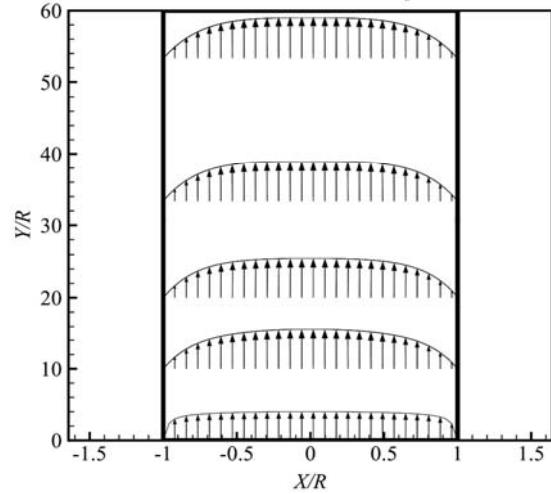


Fig. 18 Velocity profiles obtained from current study in various sections, $\Delta T=3$, $p=8\text{MPa}$, $T_{\text{avg}}=306$, $D=0.3\text{mm}$

شکل ۱۸ پروفیل‌های سرعت حاصل از تحقیق حاضر در مقاطع مختلف لوله، $\Delta T=3$
 $p=8\text{MPa}$, $T_{\text{avg}}=306$, $D=0.3\text{mm}$

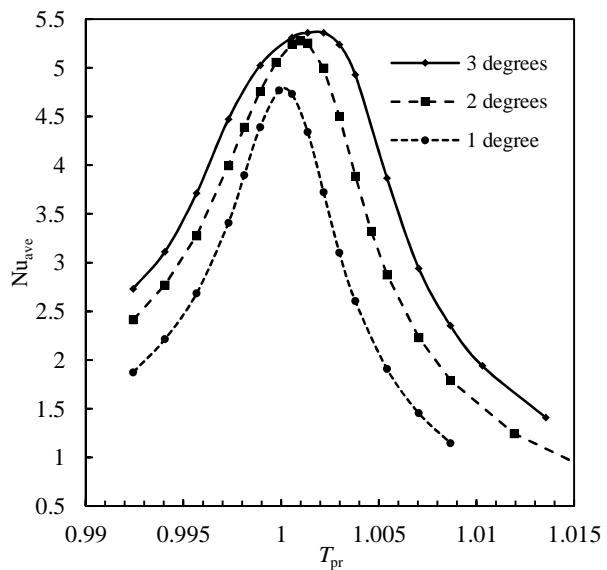


Fig. 15 Calculated Nusselt numbers for various temperature differences between surrounding and wall of 0.3mm tube at 8MPa

شکل ۱۵ اعداد ناسلت محاسبه شده در تحقیق حاضر به ازای اختلاف دماهای متفاوت
محیط با دیواره لوله به قطر 0.3 میلی‌متر و فشار 8MPa

با مقایسه سه شکل ۹، ۱۱ و ۱۵ مشاهده می‌گردد که طبق انتظار حساسیت نتایج بدست آمده به اختلاف دمای دیواره و محیط بسیار کمتر از تغییرات قطر لوله است. به دلیل متغیر بودن تمام خواص ترمودینامیکی در دامنه حل، عدد رایلی در هر نقطه از دامنه مقدار متفاوتی دارد؛ این تفاوت در نزدیکی دمای شبیه بحرانی زیاد و به طور متداول بین 100% الی 400% است. بهمنظور استفاده از یک عدد رایلی واحد می‌توان نقطه مرتع برای تعیین اعداد بی- بعد مهم را انتخاب کرد؛ اما این روش فارغ از محل نقطه مرتع (اعم از ورودی لوله، دیواره لوله یا دمای میانگین) به دلیل عدم شمول تمام پارامترهای تأثیرگذار بر مسئله، مثل فشار و دمای کاهش‌یافته، به نتایج متناقضی ختم می‌شود که نتایج حاصل از آنالیز بی-بعد جابجایی طبیعی سیال فوق بحرانی با دیوار دما ثابت را غیرقابل استفاده می‌کند.

با توجه به شکل‌های ۱۳ تا ۱۵ مشخص می‌شود که انتقال حرارت زمانی بیشتر می‌شود که دمای دیواره لوله به دمای شبیه بحرانی نزدیک‌تر باشد، همچنین برای اختلاف دماهای بالاتر منحنی عدد ناسلت در همسایگی نقطه بیشینه انحنای کمتری دارد. بهیان دیگر بازه دمایی که فرآیند جابجایی آزاد سیال فوق بحرانی کارایی بیشتری دارد با افزایش اختلاف دما بزرگ‌تر می-شود.

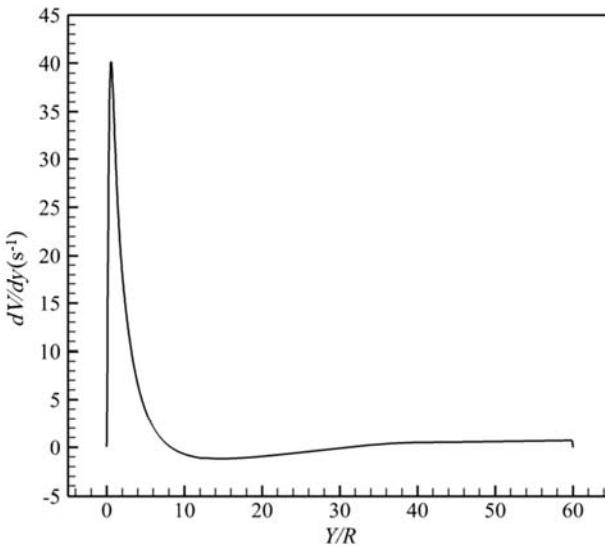
دمای شبیه بحرانی به فشار وابسته است، برای روشن شدن نتایج این دما برای چند فشار مختلف در جدول ۴ درج شده است، سپس در شکل‌های ۱۶ تا ۱۹ پروفیل‌های سرعت دیاکسید کربن ارائه شده‌اند.

جدول ۴ دمای شبیه بحرانی دیاکسید کربن در فشارهای مختلف

Table 4 Pseudo-critical temperatures of carbon dioxide at different pressures

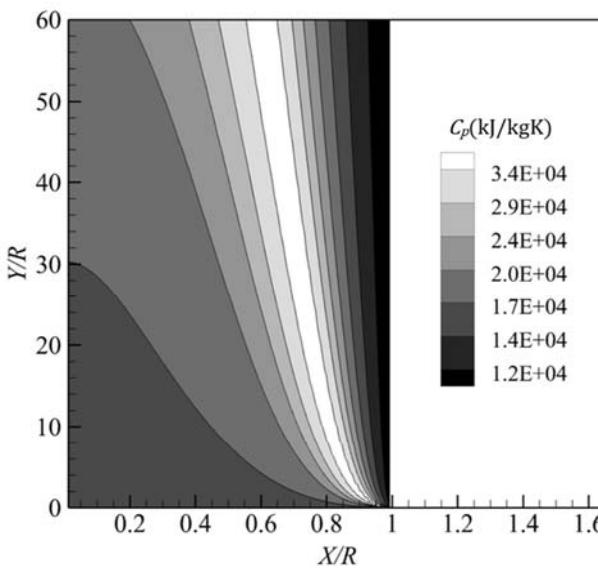
دماهای شبیه بحرانی (K) ^(*)	فشار (MPa)
304.86	7.50
307.83	8.00
310.57	8.50
313.29	9.00

^(*) دما و فشار بحرانی دیاکسید کربن به ترتیب برابر 304.25K و 7.39MPa است.

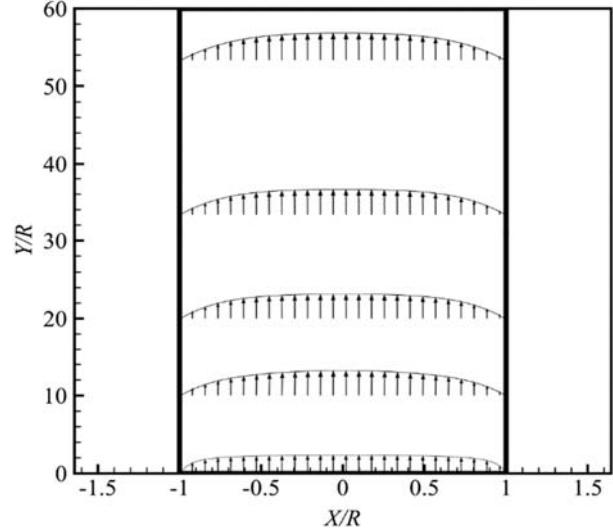


شکل 20 گرادیان سرعت عمودی در $R=0.05\text{mm}$ برای $\Delta T=2$, $p=8\text{MPa}$, $T_{\text{avg}}=307.75$, $D=0.3\text{mm}$

در این نمودار سرعت در راستای عمودی در ورودی لوله دچار تغییرات شدید و سپس بعد از طولی معادل پنج برابر قطر لوله تغییرات تا انتهای لوله ملایم و نزدیک به صفر هستند. افت کوچک و ناگهانی نمودار در آخرین گره تا صفر نشان‌دهنده اختلاف جزئی فرض تغییرات صفر با واقعیت و عدم تأثیرگذاری آن بر پایین‌دست جریان است. با توجه به شکل 17 این نمودار مربوط به سیستم با بیشترین تغییرات پروفیل سرعت است؛ بنابراین فرض توسعه‌یافته‌ی در سیستم‌های دیگر با تغییرات ملایم‌تر نیز درست است. در شکل‌های 21 تا 26 کانتورهای خواص و دمای دیاکسید کربن برای بررسی دلایل افزایش انتقال حرارت نسبت به حالت ایده‌آل و بررسی بیشتر ادعای بالا رسم شده‌اند.



شکل 21 کانتور بدست‌آمده از ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت دیاکسید کربن، $\Delta T=3$, $p=8\text{MPa}$, $T_{\text{avg}}=308.25$, $D=0.3\text{mm}$



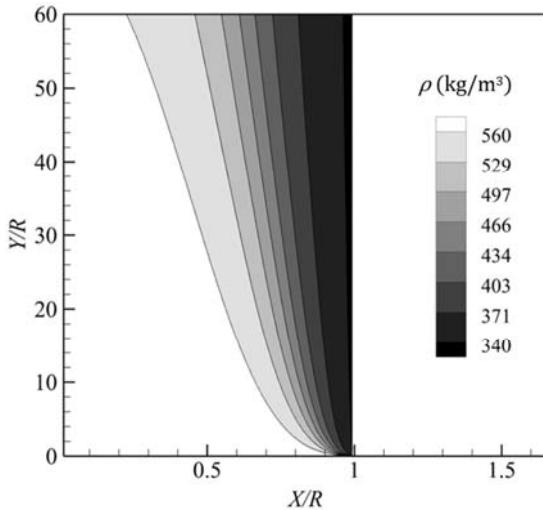
شکل 19 پروفیل‌های سرعت حاصل از تحقیق حاضر در مقاطع مختلف لوله، $\Delta T=1$, $p=8\text{MPa}$, $T_{\text{avg}}=307.5$, $D=0.2\text{mm}$

پروفیل سرعت در ورودی هر چهار شکل به پروفیل سرعت یکنواخت شبیه است، این شباهت با میزان سرعت متوسط ورودی که به میزان انتقال حرارت وابسته است رابطه مستقیم دارد. بهطور مثال در شکل 19 که در بین چهار حالت رسم شده دارای کمترین مقدار ناسلت است، پروفیل سرعت در ورودی آن بیشترین انحراف را از پروفیل سرعت یکنواخت دارد.

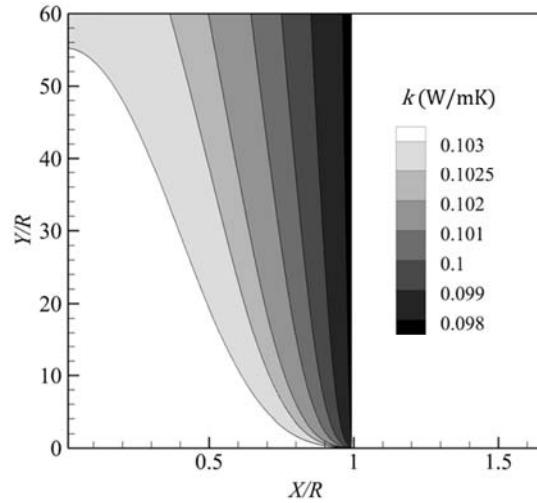
در شکل‌های 16 و 17 پروفیل‌های سرعت درنهایت به شکل M درمی‌آیند؛ اما در دو شکل بعدی پروفیل سرعت در طول لوله تغییر شکل نمی‌دهد. این الگو مثل انتقال حرارت جابجایی طبیعی گاز ایده‌آل بهطورکلی در حالت‌هایی با انتقال حرارت بالاتر دیده می‌شود و نزدیک بودن سیال به دمای شبیه بحرانی (شکل 19) بهنهایی تأثیری بر شکل پروفیل سرعت ندارد در حالی که بر میزان انتقال حرارت و عدد ناسلت تأثیر قابل توجهی دارد.

در حالت‌هایی که پروفیل سرعت M شکل هستند طول ناحیه درحال توسعه نسبت به حالت دیگر بلندتر است؛ البته توسعه‌یافتنگی کامل جریان تنها در حالتی حاصل می‌شود که طول لوله بهقدری زیاد باشد، تا دمای سیال با دمای دیوار یکسان شود. دلیل این امر تغییرات ملایم و پیوسته خواص سیال در طول لوله است که باعث می‌شود نرخ تغییرات سرعت در راستای محور لوله با پیشروی در جهت جریان به صفر نزدیک شود؛ اما برابر با صفر نشود. با توجه به این موضوع ممکن است فرض جریان توسعه‌یافته در خروجی درست به نظر نرسد. توجیه استفاده از این فرض با دو استدلال انجام می‌شود؛ اول آنکه تغییرات سرعت نسبت به محور بعد از ورودی لوله کوچک است (به طور متوسط $8.4 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ نسبت به بزرگترین مقدار تغییرات) و فرض صفر بودن این تغییرات خطای کوچکی دارد. علاوه بر این با توجه به جهت جریان و ماهیت معادلات حاکم انتشار اطلاعات از سمت پایین‌دست جریان و بیشتر توسط مکانیسم جابجایی انجام می‌شود؛ اما مکانیسم انتقال اطلاعات از مرز خروجی به داخل دامنه مکانیسم پخش در خلاف جهت جریان است که تأثیرگذاری قابل توجهی ندارد. بهاین ترتیب استفاده از شرط جریان توسعه‌یافته در این شبیه‌سازی هنگامی که طول لوله بهاندازه کافی بلند باشد، در درستی روند حل مشکلی ایجاد نخواهد کرد.

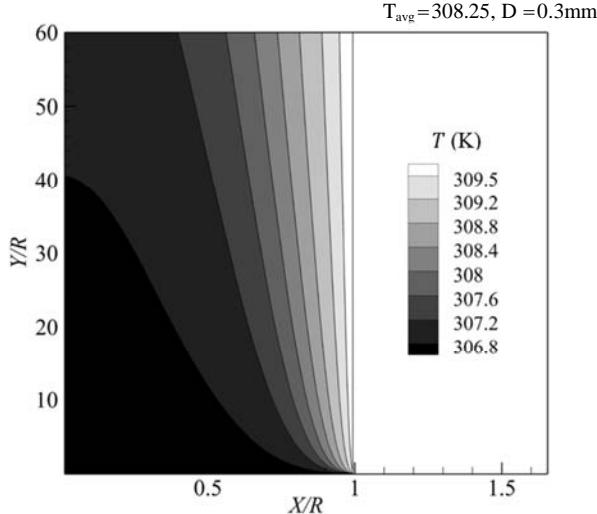
برای درک بهتر این مسئله در شکل 20 نمودار تغییرات سرعت عمودی نسبت به محور عمودی رسم شده است.



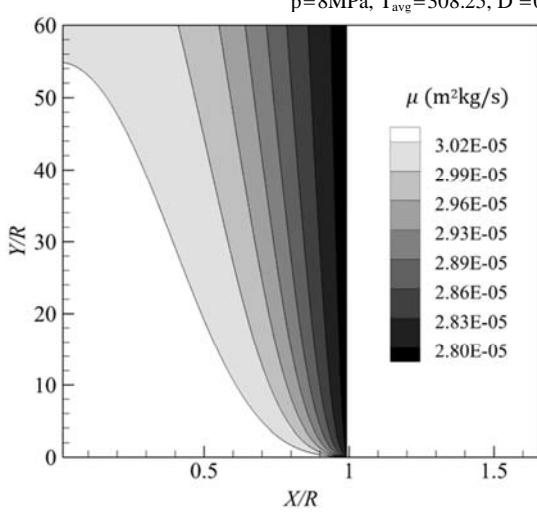
شکل 25 کانتور به دست آمده برای چگالی دیاکسید کربن، $\Delta T = 3$, $p = 8 \text{ MPa}$, $T_{\text{avg}} = 308.25$, $D = 0.3 \text{ mm}$



شکل 22 کانتور به دست آمده برای رسانش گرمایی دیاکسید کربن، $\Delta T = 3$, $p = 8 \text{ MPa}$, $T_{\text{avg}} = 308.25$, $D = 0.3 \text{ mm}$



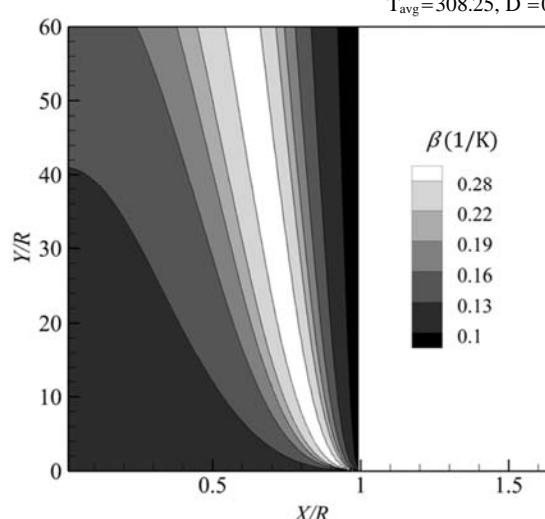
شکل 26 کانتور به دست آمده برای توزیع دمای دیاکسید کربن، $\Delta T = 3$, $p = 8 \text{ MPa}$, $T_{\text{avg}} = 308.25$, $D = 0.3 \text{ mm}$



شکل 23 کانتور به دست آمده برای ویسکوزیته دیاکسید کربن، $\Delta T = 3$, $p = 8 \text{ MPa}$, $T_{\text{avg}} = 308.25$, $D = 0.3 \text{ mm}$

شکل های 21 تا 25 کانتورهای خواص برای یک حالت با T_{avg} نزدیک دمای شبه بحرانی و پروفیل سرعت M شکل هستند. مشاهده می شود که در بین این خواص، ویسکوزیته و رسانش گرمایی کمترین تغییرات را دارند. ضریب انبساط حرارتی سیال در بین معادلات حاکم نیست اما برای تفسیر میدان سرعت و دلایل افزایش انتقال حرارت مفید است. در نزدیکی دیوار لوله ضریب انبساط حرارتی به مقدار بیشینه خود می رسد، که تقریباً سه برابر کمترین مقدارش است؛ این امر موجب افزایش سرعت در نزدیکی دیواره می شود. از طرف دیگر بیشینه شدن ظرفیت گرمایی ویژه، قابلیت دریافت و حمل انرژی گرمایی سیال را بیشتر می کند. درواقع این ناحیه متناظر با بدیده جوشش در سیال غیر بحرانی است و زمانی که دمای دیوار لوله برابر دمای شبه بحرانی باشد، بدیده شبه جوشش بر روی دیوار رخ داده و انتقال حرارت طبق شکل های 9 تا 15 به میزان بیشینه خود می رسد.

با توجه به این موضوع، دلیل عدم افزایش انتقال حرارت تغییرات چگالی و بزرگ بودن مقدار متوسط ظرفیت گرمایی است؛ البته کاهش ویسکوزیته در نزدیکی دیواره در افزایش سرعت بی تأثیر نیست.



شکل 24 کانتور به دست آمده برای ضریب انبساط حرارتی دیاکسید کربن، $\Delta T = 3$, $p = 8 \text{ MPa}$, $T_{\text{avg}} = 308.25$, $D = 0.3 \text{ mm}$

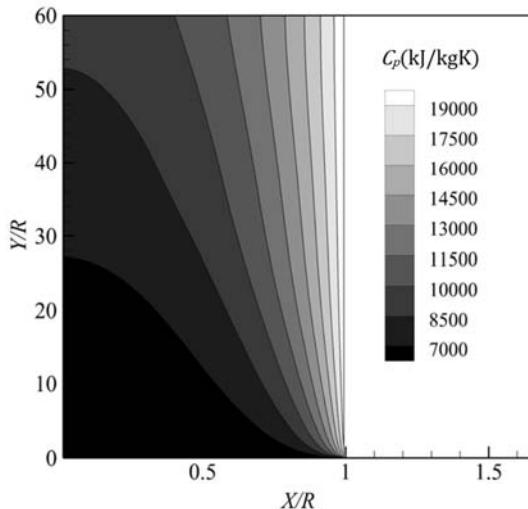


Fig. 29 Contour of special heat capacity at constant pressure for carbon dioxide, $\Delta T=3$, $p=8 \text{ MPa}$, $T_{\text{avg}}=305.5$, $D=0.3 \text{ mm}$

شکل 29 کانتور به دست آمده از ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت دیاکسید کربن، $\Delta T=3$, $p=8 \text{ MPa}$, $T_{\text{avg}}=305.5$, $D=0.3 \text{ mm}$

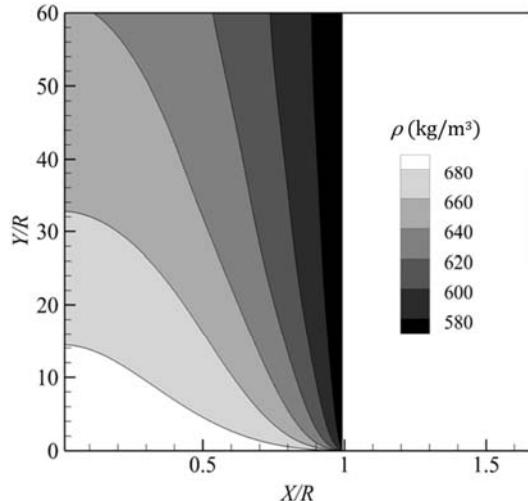


Fig. 30 Calculated contour of density for carbon dioxide, $\Delta T=3$, $p=8 \text{ MPa}$, $T_{\text{avg}}=305.5$, $D=0.3 \text{ mm}$

شکل 30 کانتور به دست آمده برای چگالی دیاکسید کربن، $\Delta T=3$, $p=8 \text{ MPa}$, $T_{\text{avg}}=305.5$, $D=0.3 \text{ mm}$

6- نتیجه‌گیری

انتقال حرارت جابجایی آزاد و آرام دیاکسید کربن فوق بحرانی درون لوله عمودی به روش عددی بررسی شد. مدل عددی در حالت غیر بحرانی انباتی خوبی با نتایج آزمایشگاهی النباس نشان داد و با در نظر گرفتن تغییرات کلیه خواص، انتقال حرارت جابجایی آزاد دیاکسید کربن فوق بحرانی در لوله با موفقیت شبیه‌سازی شد. نتایج به دست آمده در حالت فوق بحرانی افزایش قابل توجه میزان انتقال حرارت نسبت به گاز کامل را نشان می‌دهند، که نتیجه تغییرات شدید خواص در این ناحیه، بخصوص در نزدیکی دمای شبه بحرانی است. در بین خواص، افزایش کلی ظرفیت گرمایی ویژه و تغییرات شدید چگالی، در انحراف رفتار سیال از مدل گاز ایده‌آل نقش بیشتری دارند. رفتار متفاوت سیال در بعد و قبل از دمای شبه بحرانی نیز مورد بررسی قرار گرفت و نشان داده شد که بازده انتقال حرارت جابجایی آزاد در یک سیستم فوق بحرانی، با اختلاف دما و فشار معین، به دمای متوسط سیستم و موقعیت آن نسبت به دمای شبه بحرانی وابسته است؛ به طوری که برای دماهای

در شکل‌های 27 تا 30 کانتورهای چگالی، ظرفیت گرمایی و دما برای دو حالت با ناسلت کمتر جهت مقایسه با کانتورهای قبلی رسم شده‌اند. با فاصله گرفتن دمای متوسط از دمای شبه بحرانی سیال، تغییرات خواص کمتر می‌شوند که منجر به کاهش میزان انتقال حرارت و درنهایت نزدیک شدن رفتار سیال به گاز ایده‌آل می‌شود.

جابجایی طبیعی سیال فوق بحرانی به موقعیت دمای متوسط نسبت به دمای شبه بحرانی وابستگی زیادی دارد. در شکل‌های 27 و 28 که دمای متوسط از دمای شبه بحرانی بیشتر است، سیال خواص گازها را داراست. چگالی و ظرفیت گرمایی سیال نیز بر روی دیوار لوله کمترین مقدار خود را دارند، به همین دلیل در دماهای بالاتر از دمای شبه بحرانی اختلاف میزان انتقال حرارت جابجایی آزاد دیاکسید کربن فوق بحرانی با گاز ایده‌آل به کمترین مقادیر خود می‌رسد. در شکل‌های 29 و 30 قبل از دمای شبه بحرانی تغییرات خواص بر عکس دو شکل قبلی هستند و شbahat خواص سیال به مایعات اختلاف قابل توجه انتقال حرارت با گاز ایده‌آل را توجیه می‌کند.

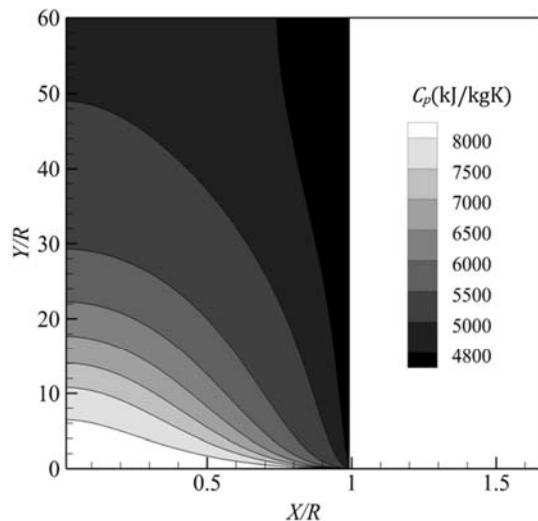


Fig. 27 Contour of special heat capacity at constant pressure for carbon dioxide, $\Delta T=3$, $p=8 \text{ MPa}$, $T_{\text{avg}}=312$, $D=0.3 \text{ mm}$

شکل 27 کانتور به دست آمده از ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت دیاکسید کربن، $\Delta T=3$, $p=8 \text{ MPa}$, $T_{\text{avg}}=312$, $D=0.3 \text{ mm}$

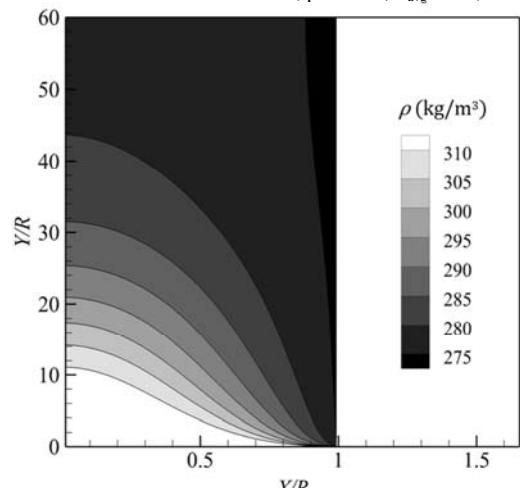


Fig. 28 Calculated contour of density for carbon dioxide, $\Delta T=3$, $p=8 \text{ MPa}$, $T_{\text{avg}}=312$, $D=0.3 \text{ mm}$

شکل 28 کانتور به دست آمده برای چگالی دیاکسید کربن، $\Delta T=3$, $p=8 \text{ MPa}$, $T_{\text{avg}}=312$, $D=0.3 \text{ mm}$

- [2] M. Perrut, Sterilization and virus inactivation by supercritical fluids (a review), *The Journal of Supercritical Fluids*, Vol. 66, No. Special edition on the occasion of Gerd Brunner's 70th birthday, pp. 359-371, 2012.
- [3] D. Huang, Z. Wu, B. Sundén, W. Li, A brief review on convection heat transfer of fluids at supercritical pressures in tubes and the recent progress, *Applied Energy*, Vol. 162, No. 1, pp. 494-505, 2016.
- [4] A. A. Bishop, R. O. Sandberg, L. S. Tong, Forced-convection heat transfer to water at near-critical temperatures and supercritical pressures, *Joint Meeting of the American Institute of Chemical Engineers and the British Institution of Chemical Engineers*, pp. 100-129, London, England, December, 1964.
- [5] W. Gang, J. Pan, Q. Bi, Z. Yang, H. Wang, Heat transfer characteristics of supercritical pressure water in vertical upward annuli, *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 273, No. 1, pp. 449-458, 2014.
- [6] Z. Q. Long, P. Zhang, B. Shen, Natural convection heat transfer of supercritical binary fluid in a long closed vertical cylinder, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 80, No. 1, pp. 551-561, 2015.
- [7] L. Wei, Y. Lu, J. Wei, Numerical study on laminar free convection heat transfer between sphere particle and high pressure water in pseudo-critical zone, *Thermal Science*, Vol. 18, No. 4, pp. 1293-1303, 2014.
- [8] A. R. Teymourtash, M. Ebrahimi, Natural convection over a non-isothermal vertical flat plate in supercritical fluids, *Scientia Iranica*, Vol. 16, No. 6, pp. 470-478, 2009.
- [9] A. R. Teymourtash, M. Ebrahimi Warkiani, Natural convection over a heated plate in super critical fluids, *11th Fluid Dynamics Conference*, Tehran, Iran, June, 2008. (in Persian فارسی)
- [10] A. R. Teymourtash, D. R. Khonakdar, M. R. Raveshti, Natural convection on a vertical plate with variable heat flux in supercritical fluids, *The Journal of Supercritical Fluids*, Vol. 74, No. 1, pp. 115-127, 2013.
- [11] A. Teymourtash, S. Noorifard, Natural convection heat transfer of a supercritical fluid in a vertical channel with isothermal condition, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 15, pp. 33-41, 2014. (in Persian فارسی)
- [12] W. Elenbaas, The dissipation of heat by free convection the inner surface of vertical tubes of different shapes of cross-section, *Physica*, Vol. 9, No. 8, pp. 865-874, 1942.
- [13] Y. Li, L. Baldacchino, Implementation of some higher-order convection schemes on non-uniform grids, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol. 21, No. 12, pp. 1201-1220, 1995.
- [14] G. Desrayaud, E. Chénier, A. Joulin, A. Bastide, B. Brangeon, J. P. Caltagirone, Y. Cherif, R. Eymard, C. Garnier, S. Giroux-Julien, Y. Harnane, P. Joubert, N. Laaroussi, S. Lassue, P. Le Quéré, R. Li, D. Saury, A. Sergeant, S. Xin, A. Zoubir, Benchmark solutions for natural convection flows in vertical channels submitted to different open boundary conditions, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 72, No. 1, pp. 18-33, 2013.
- [15] D. Rezaei Khonakdar, M. R. Raveshti, Mixed convection on a vertical plate in supercritical fluids by selecting the best equation of state, *The Journal of Supercritical Fluids*, Vol. 107, No. 1, pp. 549-559, 2016.
- [16] R. Span, W. Wagner, A New Equation of State for Carbon Dioxide Covering the Fluid Region from the Triple-Point Temperature to 1100 K at Pressures up to 800 MPa, *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, Vol. 25, No. 6, pp. 1509-1596, 1996.
- [17] R. Span, *Multiparameter equations of state: an accurate source of thermodynamic property data*, 1st Edition, pp. 15-45, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000.
- [18] E. Heidaryan, T. Hatami, M. Rahimi, J. Moghadasi, Viscosity of pure carbon dioxide at supercritical region: Measurement and correlation approach, *The Journal of Supercritical Fluids*, Vol. 56, No. 2, pp. 144-151, 2011.
- [19] A. Jarrahan, E. Heidaryan, A novel correlation approach to estimate thermal conductivity of pure carbon dioxide in the supercritical region, *The Journal of Supercritical Fluids*, Vol. 64, No. 1, pp. 39-45, 2012.

متوسط کمتر از این دما، انتقال حرارت افزایش بیشتری نسبت به سیستم معادل با گاز ایده‌آل دارد. مقدار بیشینه‌ی افزایش انتقال حرارت هنگام برابر شدن دمای دیوار لوله با دمای شبه بحرانی رخ می‌دهد و دلیل آن وقوع پدیده شبه جوشش در نزدیکی دیوار است.

7- فهرست علائم

A_P	سطح جانبی لوله (m^2)
a	انرژی آزاد هلمهولتز (J)
C_P	ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت ($JK^{-1}kg^{-1}$)
D	قطر لوله (m)
g	شتاب گرانشی زمین (ms^{-2})
h	آنالپی (Jkg^{-1})
k	رسانندگی گرمایی ($Wm^{-1}K^{-1}$)
L	طول لوله (m)
Nu	عدد ناسلت
p	فشار ($kgm^{-1}s^{-2}$)
p_{stag}	فشار سکون ($kgm^{-1}s^{-2}$)
q	شار گرمایی (Wm^{-2})
R	شعاع لوله (m)
\bar{R}	ثابت گاز برای دیاکسید کربن ($JK^{-1}mol^{-1}$)
Ra	عدد رایلی
T	(K) دما
t	(s) زمان
u	سرعت در جهت x (ms^{-1})
v	سرعت در جهت y (ms^{-1})
علائم یونانی	
α	انرژی آزاد هلمهولتز کاهش یافته
β	ضریب انبساط حرارتی (K^{-1})
μ	لزجت دینامیکی ($kgm^{-1}s^{-1}$)
ν	لزجت سینماتیکی (m^2s^{-1})
ρ	چگالی (kgm^{-3})
بالاترین‌ها	
$*$	تفیریافته
0	ایده‌آل
r	مانده
زیرنویس‌ها	
ave	مقدار متوسط
c	بحرانی
in	وروی
pc	شبه بحرانی
pc	شبه کاهش یافته
r	کاهش یافته
w	دیوار

8- مراجع

- [1] Ž. Knez, E. Markočić, M. Leitgeb, M. Primožič, M. Knez Hrnčič, M. Škerget, Industrial applications of supercritical fluids: A review, *Energy*, Vol. 77, No. 1, pp. 235-243, 2014.