



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

شهرزاد امیدوار اوغانی¹، علیرضا تیمورتاش^{2*}

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

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

* مشهد، صندوق پستی 91775-1111، teymourtash@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 26 تیر 1395

پذیرش: 10 مهر 1395

ارائه در سایت: 05 آبان 1395

کلید واژگان:

سیال فوق بحرانی

جابجایی طبیعی

لوله عمودی

روش حجم محدود

عدد ناسلت

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 شناختش 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 دی اکسید کربن فوق بحرانی به طور عددی شبیه سازی شده است. مدل سازی این فرآیند به صورت دوبعدی شبه گذرا و با استفاده از روش حجم محدود انجام گرفته است. هدف اصلی پژوهش بررسی اثر تغییرات خواص سیال فوق بحرانی نزدیک دمای شبه بحرانی آن بر میدان سرعت و دمای سیال در انتقال حرارت جابجایی طبیعی و در نهایت تأثیر این تغییرات بر میزان کل انتقال حرارت صورت گرفته به سیال نسبت به حالت غیر بحرانی است. مدل سازی فرآیند انتقال حرارت بین دماهای 305 تا 312 کلین و فشارهای 7.5 تا 9 مگا پاسکال انجام شده است. در این تحقیق به منظور محاسبه خواص دی اکسید 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 نرخ انتقال حرارت جابجایی آزاد به دی اکسید کربن در حالت فوق بحرانی نسبت به فرض گاز ایده آل تا 160% در نزدیکی نقطه شبه بحرانی و در دیگر نقاط افزایش تا 118% است.

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.

1- مقدمه

منحصر به فرد دیگر آن ها تغییرات سریع خواص در نزدیکی دمای شبه بحرانی در ازای تغییرات کوچک دما است [3]؛ که موجب می شود خواص سیال فوق بحرانی برای فرآیندهای مختلف با کنترل دما قابل تنظیم باشند. در بین سیالات فوق بحرانی، دی اکسید کربن به دلیل در دسترس بودن، هزینه کم، دمای بحرانی پایین، غیر سمی و غیر قابل اشتعال بودن از پرکاربردترین سیالات فوق بحرانی است.

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

Please cite this article using:

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)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

عمودی با دیواره‌ی دما ثابت (T_w) می‌باشد که در شکل 1 به همراه دستگاه مختصات استفاده شده و یکی از حجم‌های کنترلی (یا 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 ($L/D \geq 30$).

جریان آرام و پایا برای یک سیال نیوتنی 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-ناپایا⁴ استفاده شده است. بقای جرم، مومنتوم و انرژی معادلات حاکم بر مسئله هستند که به ترتیب در روابط (1) تا (3) 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 محاسبه‌ی آن‌ها در ادامه ذکر شده است. عدد رایلی تغییر یافته (Ra^*)، ناسلت متوسط (Nu_{ave})، ناسلت محلی (Nu_y) و دمای شبه کاهش یافته از پارامترهای مهم این مسئله هستند؛ که در روابط (4) تا (7) بر اساس مقدار خواص بر روی دیوار لوله تعریف شده‌اند [12].

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

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

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

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

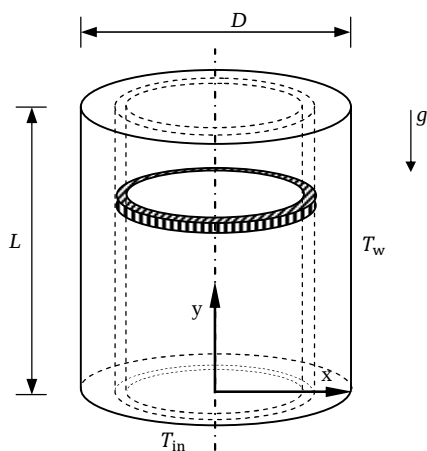


Fig. 1 Problem geometry and utilized control volume

شکل 1 هندسه مسئله و حجم کنترلی استفاده شده

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 زمین گرمایی است؛ به همین منظور انتقال حرارت جابجایی در سیالات فوق بحرانی از دهه شصت میلادی تاکنون به‌منظور افزایش بازده فرایند انتقال حرارت جابجایی مورد تحقیق و مطالعه قرار گرفته است [4-6].

وی و همکاران انتقال حرارت جابجایی آزاد و آرام از یک ذره‌ی کروی به آب فوق بحرانی را به‌طور 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 برحسب آنتالپی نوشته شده است. نتایج به‌دست آمده از این شبیه‌سازی نشان می‌دهند که مدل واقعی نسبت به مدل بوزینسک نتایج بهتری ارائه می‌دهد [7].

تیمورتاش و ورکیانی انتقال حرارت جابجایی آزاد به دی اکسید 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 برحسب تابعی از دما، فشار، ثابت‌های وندروالس و ضریب تراکم‌پذیری تعریف شده است. این مطالعه علاوه بر افزایش انتقال حرارت در حالت فوق بحرانی، نشان می‌دهد که تغییرات دمای دیواره با شیب مثبت و مثبت باعث افزایش بیشتر انتقال حرارت و شیب منفی باعث کاهش آن می‌شود [9,8].

تیمورتاش و همکاران انتقال حرارت جابجایی آزاد به دی اکسید 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 ردلیش-وانگ³ به‌صورت تابعی از دما، فشار و ضریب تراکم‌پذیری بیان شده که نسبت معادله حالت وندروالس دقیق‌تر است. مطالعات انجام شده علاوه بر بهبود انتقال حرارت در حالت فوق بحرانی نشان‌دهنده افزایش انتقال حرارت از دیواره تحت شار گرمایی با شیب مثبت ثابت و کاهش آن تحت شار گرمایی با شیب منفی است [10].

تیمورتاش و نوری فرد انتقال حرارت جابجایی طبیعی سیال فوق بحرانی را در کانال عمودی دما ثابت با بهره‌گیری از معادله حالت ردلیش-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 [11].

در این تحقیق برخلاف تحقیقات دیگر شبیه‌سازی در دمای شبه بحرانی انجام گرفته است. ابتدا به بررسی تغییرات خواص سیال دی اکسید 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 دی اکسید کربن در جوار دمای شبه بحرانی و در نهایت به برآورد کل انتقال حرارت صورت گرفته در مقایسه با حالت فرض گاز ایده آل پرداخته شده است؛ در این ارتباط خواص دی اکسید کربن در حالات مختلف و نزدیک به نقطه بحرانی برای اولین بار به‌طور 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 لوله‌ی

¹ Boussinesq

² Van der Waals

³ Redlich-Kwong

⁴ Pseudo-transient

2-3- شرط مرزی خروجی

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

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

3-3- شرط مرزی دیواره لوله

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

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

4-3- شرط مرزی تقارن محوری

شرط مرزی اعمال شده برای مرکز لوله بر اساس تقارن محوری هندسه، در رابطه (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 دی اکسید کربن فوق بحرانی

در این شبیه سازی دی اکسید 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 غیر قابل اشتعال بودن در فرآیندهای صنعتی بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. در جدول 1 دما و فشار بحرانی چند سیال قابل مشاهده است.

1-4- معادله حالت

معادلات حالت مکعبی (وندروالس، ردلیش-وانگ و ...) در همسایگی دمای شبه بحرانی دقت کافی ندارند [15]؛ از آنجاکه هدف این تحقیق شبیه سازی جابجایی طبیعی در دمای شبه بحرانی سیال است، استفاده از معادلات حالت مکعبی میسر نیست؛ در نتیجه برای محاسبه خواص ترمودینامیکی دی اکسید 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

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

⁸ Multi-parameter equation of state

معادلات حاکم بر مسئله با استفاده از روش حجم محدود تفاضلی شده اند که در آن برای جداسازی جملات جابجایی¹ از روش ترکیبی درجه دوم² استفاده شده است؛ در این روش بر اساس عدد پکلت از روش مرکزی³، کوئیک⁴ یا بالادست درجه دوم⁵ استفاده می شود [13] و برای ارتباط بین میدان فشار و سرعت الگوریتم پیرو⁶ به کار گرفته شده است. به جهت حل معادلات تفاضلی حاصل شده، با استفاده از زبان برنامه نویسی فرترن⁷ 95 برنامه ای برای پیاده سازی الگوریتم ها و محاسبات معادله حالت، تدوین و استفاده شده است.

حوزه حل با توجه به شکل 2 به حلقه های هم مرکز تقسیم و شبکه بندی شده است و به منظور افزایش دقت نتایج، شبکه بندی در ناحیه هایی با تغییرات بزرگ ریزتر می باشد؛ یعنی در ناحیه ورودی و نزدیکی دیوارها ضخامت حجم های 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 می شود؛ اما انقباض در راستای محوری، به دلیل تعداد بالای گره ها و طول لوله در این شکل محسوس نیست.

3- شرایط مرزی

دزریو و همکاران درباره شرایط مرزی انتقال حرارت جابجایی به طور مفصل تحقیق و بحث نموده اند [14]. در این پژوهش از شرایط مرزی توصیه شده در این مرجع استفاده شده است.

1-3- شرط مرزی ورودی

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

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

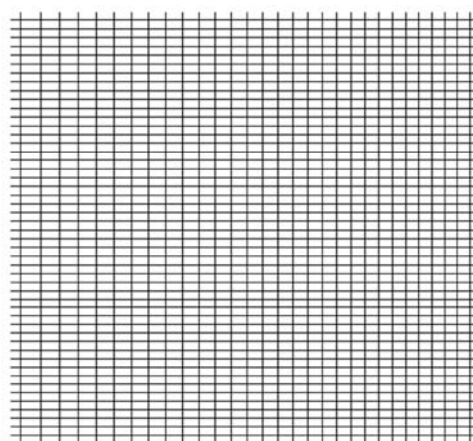


Fig. 2 Solution grid at inlet and tube wall

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 شده اند.

در این مدل ترمودینامیکی خواص ماده برحسب دما و چگالی ماده تعریف شده اند؛ درحالی 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 روش های تکراری نیاز به حدس اولیه است؛ برای این منظور از معادله حالت مکعبی سوو⁵، رابطه ای اصلاح شده بر اساس معادله حالت ردلیش-وانگ، استفاده شده است.

نتایج به دست آمده در این تحقیق پس از انجام محاسبات لازم از معادله حالت، در شکل های 3 تا 5 قابل مشاهده هستند. برخی از خواص سیال در دمای شبه بحرانی به مقدار بیشینه خود می رسند و بقیه خواص در حوالی این دما دچار تغییرات شدید می شوند. درواقع دمای شبه بحرانی دمایی است که در یک فشار معین، مقدار ظرفیت گرمایی ویژه به مقدار بیشینه خود می رسد.

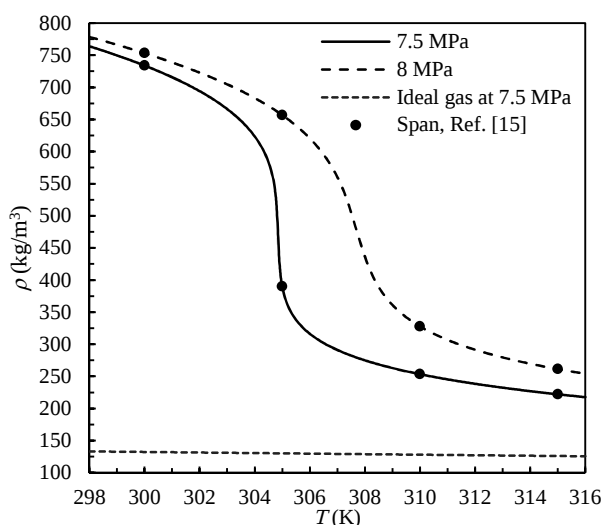


Fig. 3 Calculated density of supercritical carbon dioxide

شکل 3 چگالی محاسبه شده برای دی اکسید کربن فوق بحرانی

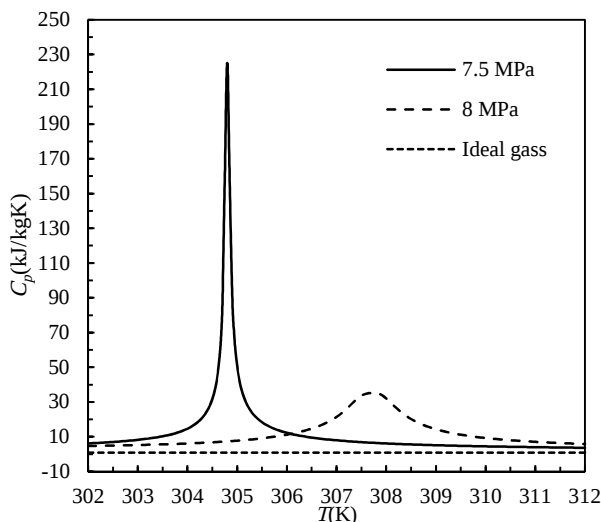


Fig. 4 Calculated isobaric heat capacity of supercritical carbon dioxide

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

معادله حالت مذکور با برازش بر نتایج هزار و پانصد داده آزمایشگاهی و استفاده از تکنیک های بهینه سازی ریاضی، انرژی آزاد هلمهولتز¹ را برحسب چگالی و دما به طور صریح محاسبه می کند. با مشتق گیری از این رابطه می توان خواص ترمودینامیکی دی اکسید 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 شده اند؛ این معادلات معمولاً انرژی هلمهولتز یا فشار را به صورت تابعی از دما و چگالی تعریف می کنند. با مشتق گیری از انرژی هلمهولتز نسبت به دما و چگالی می توان 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 برحسب فشار باید قابل انتگرال گیری باشند، شکل تابع را به شدت محدود می کند و اجازه تعریف و تدوین معادلات حالت دقیق را نمی دهد.

معادلات حالت بر پایه انرژی هلمهولتز از دو بخش ایده آل و مانده² تشکیل می شوند. بخش ایده آل (α^0) فرض می کند مولکول ها به صورت نقطه های دارای جرم هستند؛ یعنی فضایی اشغال نمی کنند و تنها راه ذخیره انرژی توسط آن ها حرکت انتقالی، چرخشی و نوسان است؛ همچنین مولکول ها با یکدیگر تعاملی جز برخورد الاستیک ندارند. بقیه رفتارها و تعامل های باقیمانده مولکول ها در قسمت مانده (α^r) در نظر گرفته می شوند. برخلاف مدل های ارائه شده برای گاز ایده آل، مدل های بخش مانده با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی ندارند؛ به همین دلیل معادلات دقیق ارائه شده برای بخش مانده روابط تجربی هستند. اسپن و وگنر برای قسمت ایده آل و مانده معادله حالت دی اکسید کربن روابط (12) تا (16) را ارائه کرده اند.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

برای محاسبه خواص ترمودینامیکی از معادله حالت، نیاز به مشتق گیری از آن برحسب τ و δ است. جزئیات مربوط به مشتق ها و رابطه آن ها با خواص

³ iterative

⁴ Regula falsi

⁵ Soave

¹ Helmholtz free energy

² Residual

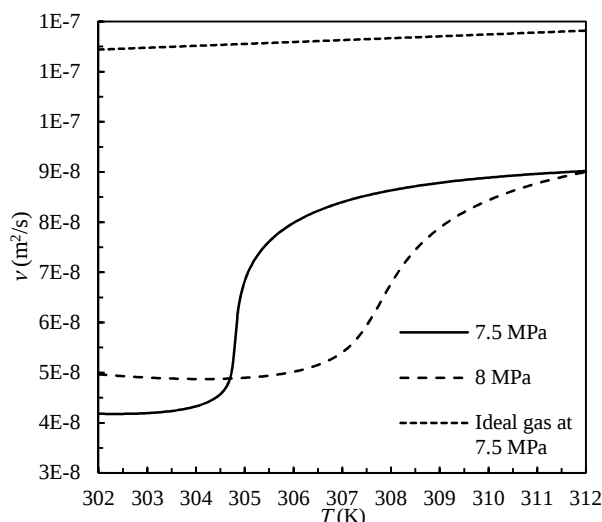


Fig. 6 Calculated Kinematic viscosity of supercritical carbon dioxide
 شکل 6 ویسکوزیته سینماتیکی محاسبه شده برای دی اکسید کربن فوق بحرانی

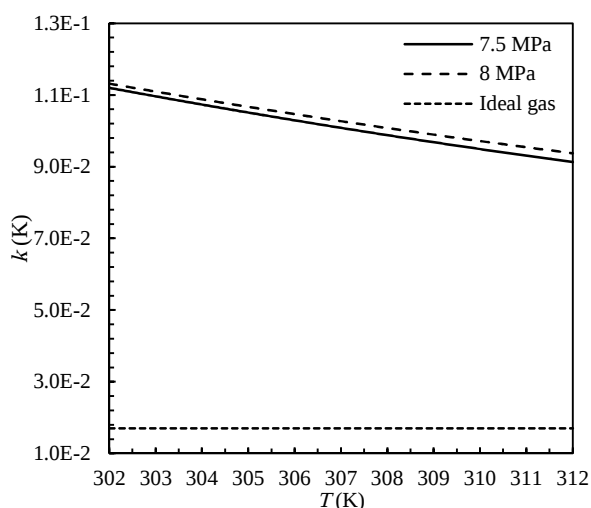


Fig. 7 Calculated thermal conductivity of supercritical carbon dioxide
 شکل 7 ضریب رسانش گرمایی محاسبه شده برای دی اکسید کربن فوق بحرانی

نتایج

1-1- 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 2 از شبکه 3000×50 برای حل عددی معادلات حاکم استفاده شده است؛ زیرا در این بازه نتایج به تعداد گره‌های استفاده شده وابسته نیستند.

جدول 2 بررسی استقلال نتایج از شبکه

شبکه	ناست 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

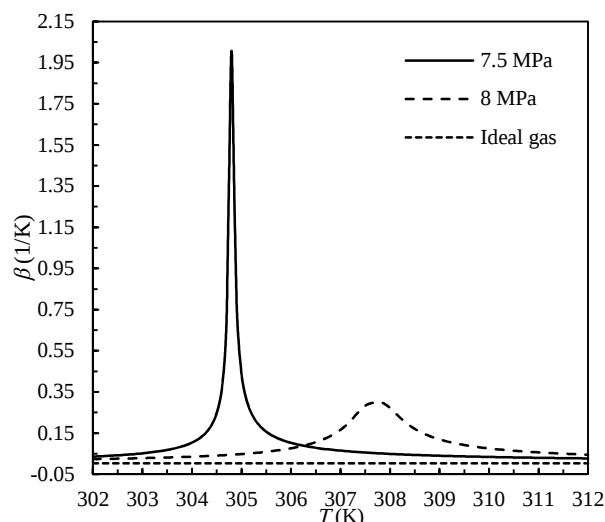


Fig. 5 Calculated thermal expansion coefficient of supercritical carbon dioxide

شکل 5 ضریب انبساط پذیری حرارتی محاسبه شده دی اکسید کربن فوق بحرانی

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

2-4- ویسکوزیته

حیدریان و همکاران با استفاده از نتایج آزمایشگاهی خود و دیگر نتایج آزمایشگاهی در دسترس رابطه‌ی (20) را برای پیش‌بینی ویسکوزیته دی اکسید کربن در ناحیه فوق بحرانی ارائه داده‌اند [18]. نتایج حاصل از این رابطه در شکل 6 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 کلون و واحد ویسکوزیته سانتی پویز است. ضرایب A_1 تا A_9 نیز در مرجع [18] ارائه شده‌اند.

3-4- ضریب رسانش گرمایی

جراحیان و حیدریان رابطه‌ی (21) را بر اساس 668 داده آزمایشگاهی برای محاسبه ضریب رسانش گرمایی دی اکسید کربن فوق بحرانی ارائه کرده‌اند [19].

$$k = \frac{B_1 + B_2 p + B_3 p^2 + B_4 \ln(T) + B_5 (\ln(T))^2 + B_6 (\ln(T))^3}{1 + B_7 p + B_8 \ln(T) + B_9 (\ln(T))^2 + B_{10} (\ln(T))^3} \quad (21)$$

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_{10} در مرجع [19] ارائه شده‌اند.

نتایج به دست آمده از این رابطه در شکل 7 ترسیم شده‌اند. برخلاف دیگر خواص، ضریب رسانش گرمایی و ویسکوزیته دینامیکی در نزدیکی دمای شبه بحرانی دچار تغییرات شدید نمی‌شوند؛ ولی ویسکوزیته سینماتیکی به دلیل وابسته بودن به مقدار چگالی، در حوالی دمای شبه بحرانی افزایش پیدا می‌کند.

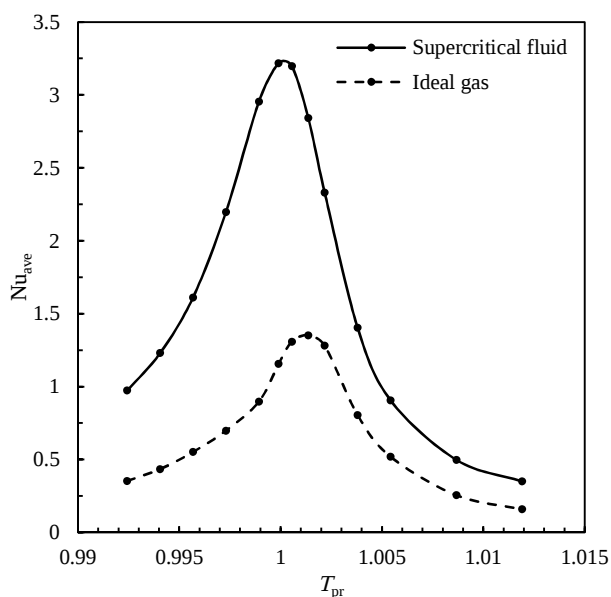


Fig. 9 Nusselt numbers for a tube of 0.2mm diameter and temperature difference of 1 degree at 8MPa

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 ایده آل ابتدا عدد رایلی تغییر یافته در حالت فوق بحرانی متناظر با آن دما محاسبه و سپس عدد ناسلت برای گاز ایده آل با درونیابی از نتایج شکل 8 به دست آمده است. همچنین لازم به ذکر است که دمای شبه کاهش یافته بر اساس T_{avg} برابر با میانگین دمای ورودی و دیواره لوله، تعریف شده است. در این شکل مشاهده می شود که میزان انتقال حرارت سیال فوق بحرانی نسبت به گاز ایده آل با Ra^* برابر، بیشتر است و میزان آن در نزدیکی دمای شبه بحرانی (307.83K) بیشینه می شود. نتایج به دست آمده برای لوله با قطر بزرگ تر (0.4 میلی متر) در شکل های 10 تا 12 رسم شده اند.

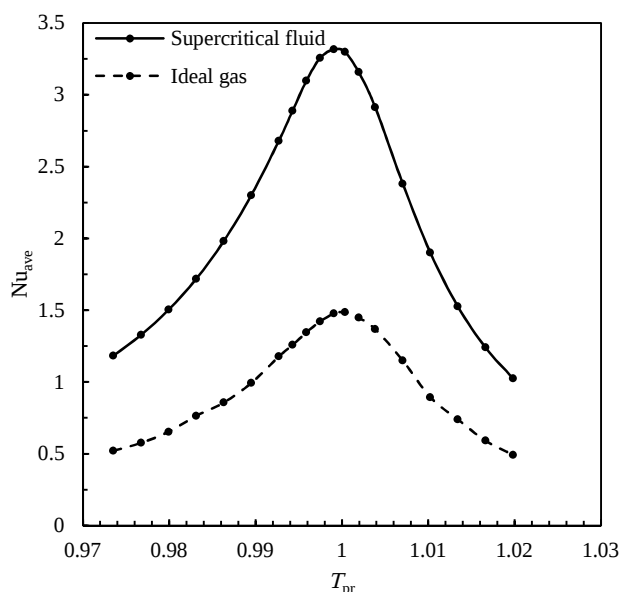


Fig. 10 Nusselt numbers for a tube of 0.4mm diameter and temperature difference of 1 degree at 9MPa

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

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

جدول 3 حاوی نتایج به دست آمده برای سه حالت مختلف با عدد رایلی تغییر یافته یکسان و نسبت طول به قطر متفاوت است؛ با توجه با این جدول مشاهده می شود که جواب های به دست آمده برای نسبت طول به قطر 30 از این نسبت مستقل هستند.

3-5- اعتبار سنجی نتایج

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

4-5- 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 دی اکسید کربن غیر بحرانی با فرض گاز ایده آل و دی اکسید کربن فوق بحرانی در نزدیکی دمای شبه 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

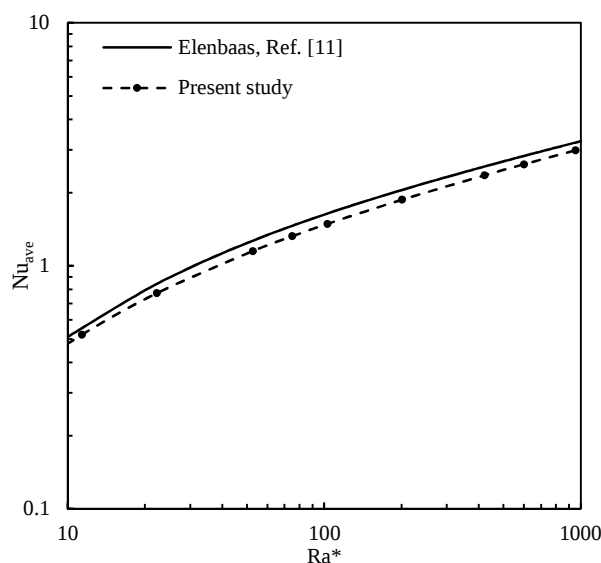


Fig. 8 Comparison of numerical and semi-empirical results inside a tube [12]

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

یکسان نسبت به فشارهای دیگر می شود. نکته قابل توجه دیگر کاهش عدد ناسلت بیشینه با افزایش فشار می باشد. این اتفاق حاصل اثر فشار بر خواص ترمودینامیکی و همچنین تغییرات ملایم تر این خواص (شکل های 3 تا 5) نسبت به دما در فشارهای بالاتر است.

تفاوت روند کلی نمودار عدد ناسلت در شکل 12 به دلیل نزدیک شدن فشار سیال به فشار بحرانی است؛ زیرا با افزایش فشار دمای شبه بحرانی به دمای بحرانی سیال نزدیک می شود. به همین دلیل تنها بخش کاهش عدد ناسلت با افزایش دمای متوسط در نمودار مشاهده می شود. در شکل های 13 تا 15 نتایج به دست آمده برای اختلاف دماهای بیشتر ارائه شده اند.

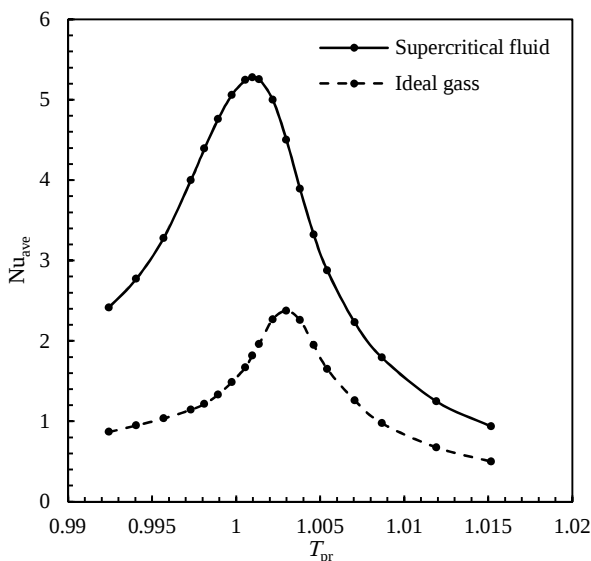


Fig. 13 Calculated Nusselt numbers for a tube of 0.3mm diameter and temperature difference of 2 degrees at 8MPa

شکل 13 اعداد ناسلت به دست آمده در تحقیق حاضر برای لوله به قطر 0.3 میلی متر و 2 درجه اختلاف دما در فشار 8MPa

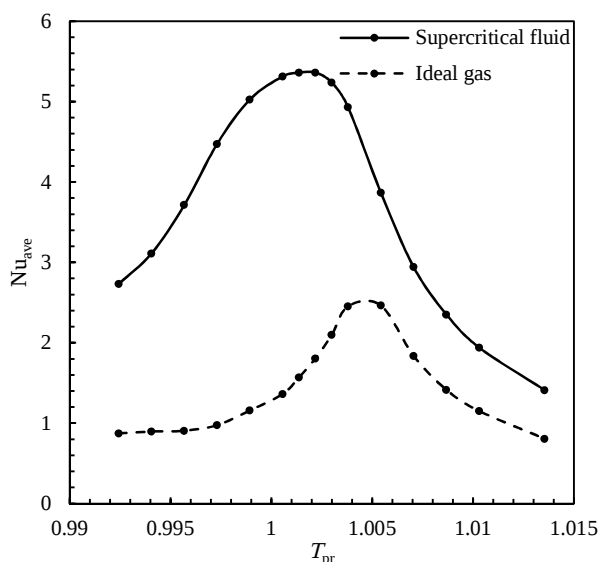


Fig. 14 Calculated Nusselt numbers for a tube of 0.3mm diameter and temperature difference of 3 degree at 8MPa

شکل 14 اعداد ناسلت به دست آمده در تحقیق حاضر برای لوله به قطر 0.3 میلی متر و 3 درجه اختلاف دما در فشار 8MPa

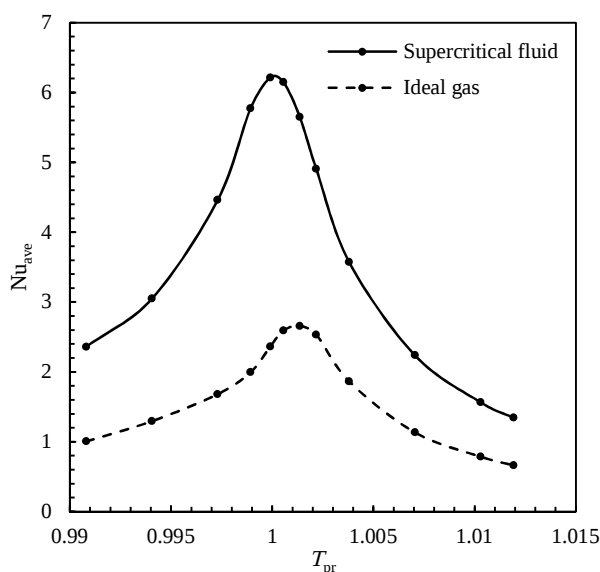


Fig.11 Nusselt numbers for a tube of 0.4mm diameter and temperature difference of 1 degree at 8MPa

شکل 11 اعداد ناسلت به دست آمده برای لوله با قطر 0.4 میلی متر و 1 درجه اختلاف دما در فشار 8MPa

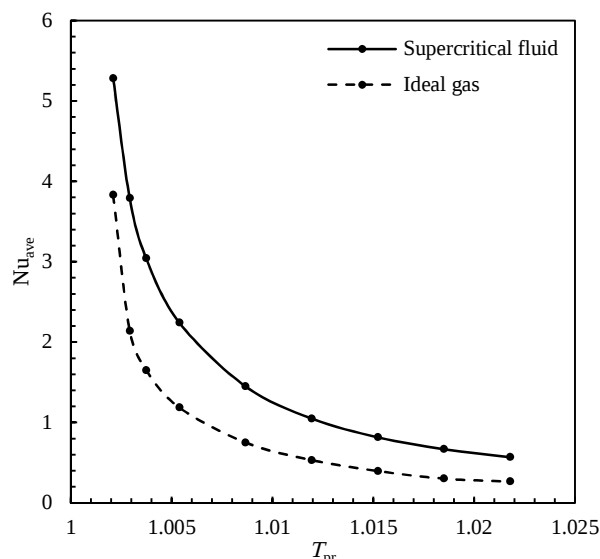


Fig. 12 Nusselt numbers for a tube of 0.4mm diameter and temperature difference of 1 degree at 7.5MPa

شکل 12 اعداد ناسلت به دست آمده برای لوله با قطر 0.4 میلی متر و 1 درجه اختلاف دما در فشار 7.5MPa

با بررسی شکل های 10 تا 12 مشاهده می شود که عدد ناسلت همچنان در حوالی دمای شبه بحرانی به بیشترین مقدار خود می رسد. با مقایسه شکل 9 با 11 تأثیر قطر لوله بر فرآیند انتقال حرارت مشخص می شود که طبق انتظار با افزایش قطر لوله میزان انتقال حرارت هم افزایش یافته و روند تغییرات منحنی حفظ شده است. در شکل های 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 شکل ها 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 می گردد که این امر در نهایت منجر به تغییر رفتار سیال در دمای میانگین

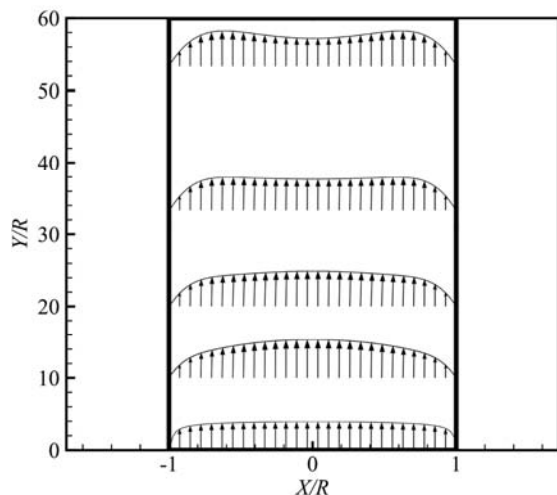


Fig. 16 Velocity profiles obtained from current study in various sections, $\Delta T=1$, $p=8\text{MPa}$, $T_{\text{avg}}=307.5$, $D=0.4\text{mm}$

شکل 16 پروفیل‌های سرعت حاصل از تحقیق حاضر در مقاطع مختلف لوله، $\Delta T=1$
 $p=8\text{MPa}$, $T_{\text{avg}}=307.5$, $D=0.4\text{mm}$

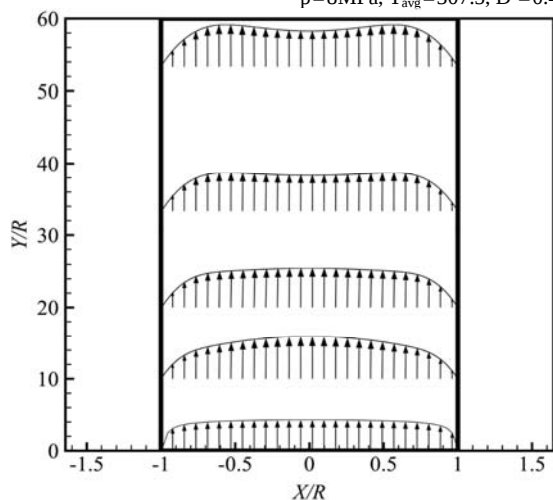


Fig. 17 Velocity profiles obtained from current study in various sections, $\Delta T=2$, $p=8\text{MPa}$, $T_{\text{avg}}=307.75$, $D=0.3\text{mm}$

شکل 17 پروفیل‌های سرعت حاصل از تحقیق حاضر در مقاطع مختلف لوله، $\Delta T=2$
 $p=8\text{MPa}$, $T_{\text{avg}}=307.75$, $D=0.3\text{mm}$

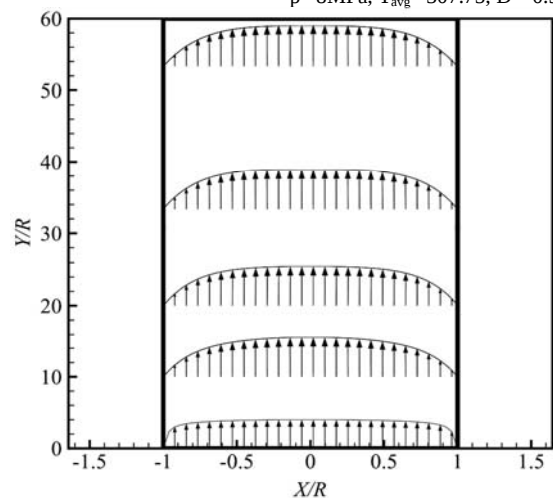


Fig. 18 Velocity profiles obtained from current study in various sections, $\Delta T=3$, $p=8\text{MPa}$, $T_{\text{avg}}=306$, $D=0.3\text{mm}$

شکل 18 پروفیل‌های سرعت حاصل از تحقیق حاضر در مقاطع مختلف لوله، $\Delta T=3$
 $p=8\text{MPa}$, $T_{\text{avg}}=306$, $D=0.3\text{mm}$

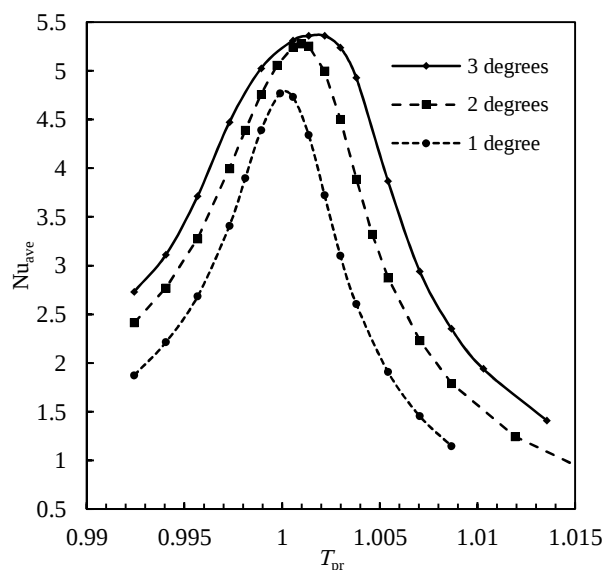


Fig. 15 Calculated Nusselt numbers for various temperature differences between surrounding and wall of 0.3mm tube at 8MPa

شکل 15 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 9، 11 و 15 مشاهده می‌گردد که طبق انتظار حساسیت نتایج به دست 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 رابلی در هر نقطه از دامنه مقدار متفاوتی دارد؛ این تفاوت در نزدیکی دمای شبه بحرانی زیاد و به طور متداول بین 100% الی 400% است. به منظور استفاده از یک عدد رابلی واحد می‌توان نقطه مرجع برای تعیین اعداد بی- بعد مهم را انتخاب کرد؛ اما این روش فارغ از محل نقطه مرجع (اعم از ورودی لوله، دیواره لوله یا دمای میانگین) به دلیل عدم شمول تمام پارامترهای تأثیرگذار بر مسئله، مثل فشار و دمای کاهش یافته، به نتایج متناقضی ختم می‌شود که نتایج حاصل از آنالیز بی‌بعد جابجایی طبیعی سیال فوق بحرانی با دیوار دما ثابت را غیرقابل استفاده می‌کند.

با توجه به شکل‌های 13 تا 15 مشخص می‌شود که انتقال حرارت زمانی بیشتر می‌شود که دمای دیواره لوله به دمای شبه بحرانی نزدیک‌تر باشد، همچنین برای اختلاف دماهای بالاتر منحنی عدد ناسلت در همسایگی نقطه بیشینه انحنای کمتری دارد. به بیان دیگر بازه دمایی که فرایند جابجایی آزاد سیال فوق بحرانی کارایی بیشتری دارد با افزایش اختلاف دما بزرگ‌تر می‌شود.

دمای شبه بحرانی به فشار وابسته است، برای روشن شدن نتایج این دما برای چند فشار مختلف در جدول 4 درج شده است؛ سپس در شکل‌های 16 تا 19 پروفیل‌های سرعت دی اکسید کربن ارائه شده‌اند.

جدول 4 دمای شبه بحرانی دی اکسید کربن در فشارهای مختلف

فشار (MPa)	دمای شبه بحرانی (K) (*)
7.50	304.86
8.00	307.83
8.50	310.57
9.00	313.29

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

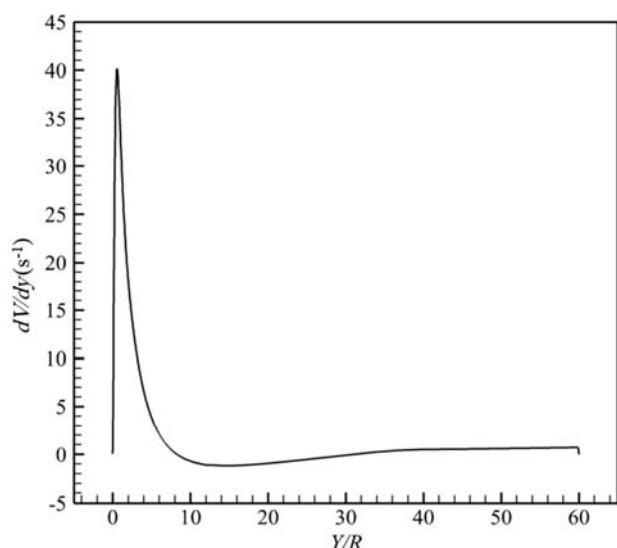


Fig. 20 Vertical velocity gradient at $R=0.05\text{mm}$ for $\Delta T=2$, $p=8\text{MPa}$, $T_{\text{avg}}=307.75$, $D=0.3\text{mm}$

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 نشان دهنده اختلاف جزئی فرض تغییرات صفر با واقعیت و عدم تأثیرگذاری آن بر پایین دست جریان است. با توجه به شکل 17 این نمودار مربوط به سیستم با بیشترین تغییرات پروفیل سرعت است؛ بنابراین فرض توسعه یافتگی در سیستم های دیگر با تغییرات ملایم تر نیز درست است.

در شکل های 21 تا 26 کانتورهای خواص و دمای دی اکسید کربن برای بررسی دلایل افزایش انتقال حرارت نسبت به حالت ایده آل و بررسی بیشتر ادعای بالا رسم شده اند.

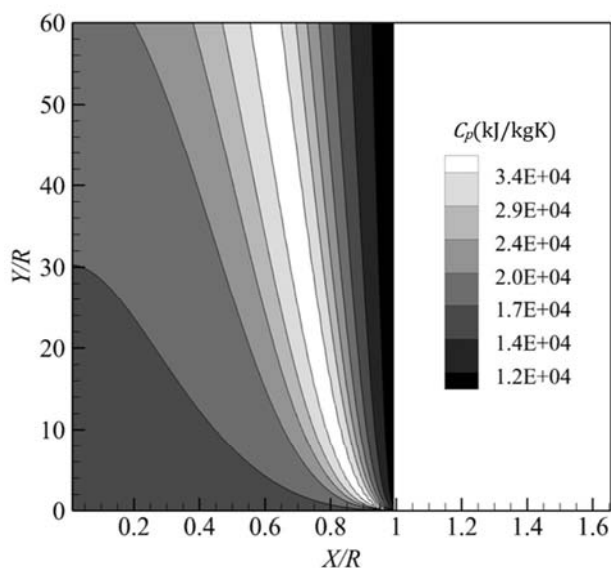


Fig. 21 Calculated contour of special heat capacity at constant pressure for carbon dioxide, $\Delta T=3$, $p=8\text{MPa}$, $T_{\text{avg}}=308.25$, $D=0.3\text{mm}$

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

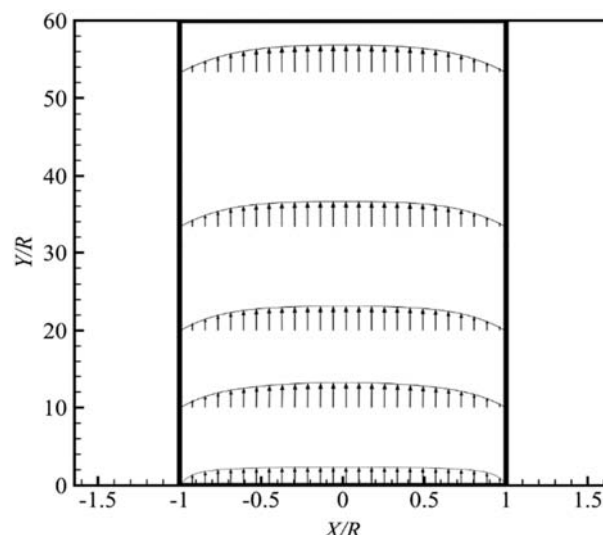


Fig. 19 Velocity profiles obtained from current study in various sections, $\Delta T=1$, $p=8\text{MPa}$, $T_{\text{avg}}=307.5$, $D=0.2\text{mm}$

شکل 19 پروفیل های 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. به طور 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 شکل های 16 و 17 پروفیل های سرعت در نهایت به شکل M درمی آیند؛ اما در دو شکل بعدی پروفیل سرعت در طول لوله تغییر شکل نمی دهد. این الگو مثل انتقال حرارت جابجایی طبیعی گاز ایده آل به طور کلی در حالت هایی با انتقال حرارت بالاتر دیده می شود و نزدیک بودن سیال به دمای شبه بحرانی (شکل 19) به تنهایی تأثیری بر شکل پروفیل سرعت ندارد درحالی که بر میزان انتقال حرارت و عدد ناسلت تأثیر قابل توجهی دارد.

در حالت هایی که پروفیل سرعت M شکل هستند طول ناحیه درحال توسعه نسبت به حالت دیگر بلندتر است؛ البته توسعه یافتگی کامل جریان تنها در حالتی حاصل می شود که طول لوله به قدری 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 می شود 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 توسعه یافته در خروجی درست به نظر نرسد. توجیه استفاده از این فرض با دو استدلال انجام می شود؛ 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 پایین دست جریان و بیشتر توسط مکانیسم جابجایی انجام می شود؛ اما مکانیسم انتقال اطلاعات از مرز خروجی به داخل دامنه مکانیسم پخش در خلاف جهت جریان است که تأثیرگذاری قابل توجهی ندارد. به این ترتیب استفاده از شرط جریان توسعه یافته در این شبیه سازی هنگامی که طول لوله به اندازه 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.

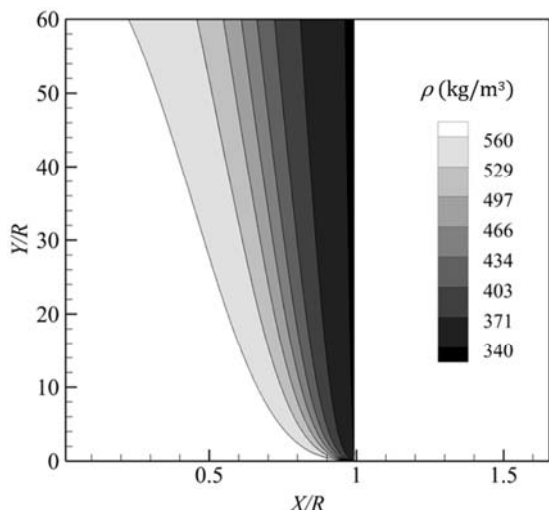


Fig. 25 Calculated contour of density for carbon dioxide, $\Delta T=3$, $p=8\text{MPa}$, $T_{\text{avg}}=308.25$, $D=0.3\text{mm}$

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

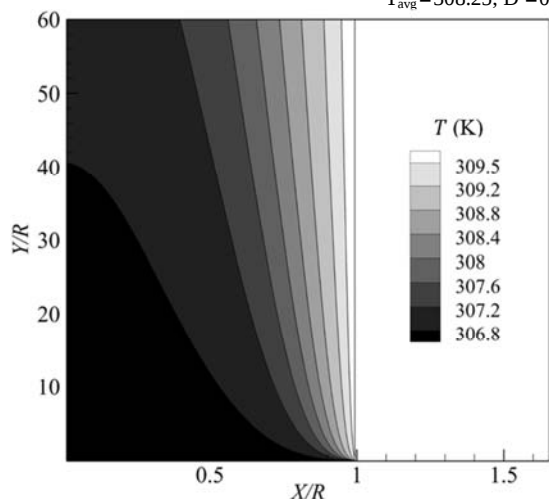


Fig. 26 Calculated contour of temperature for carbon dioxide, $\Delta T=3$, $p=8\text{MPa}$, $T_{\text{avg}}=308.25$, $D=0.3\text{mm}$

شکل 26 کانتور به دست آمده برای توزیع دمای دی اکسید 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 پدیده جوشش در سیال غیر بحرانی است و زمانی که دمای دیوار لوله برابر دمای شبه بحرانی باشد، پدیده 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 عمده 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.

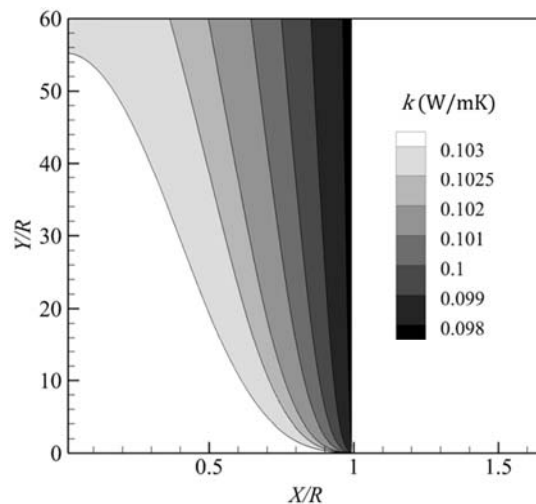


Fig. 22 Calculated contour of thermal conductivity for carbon dioxide, $\Delta T=3$, $p=8\text{MPa}$, $T_{\text{avg}}=308.25$, $D=0.3\text{mm}$

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

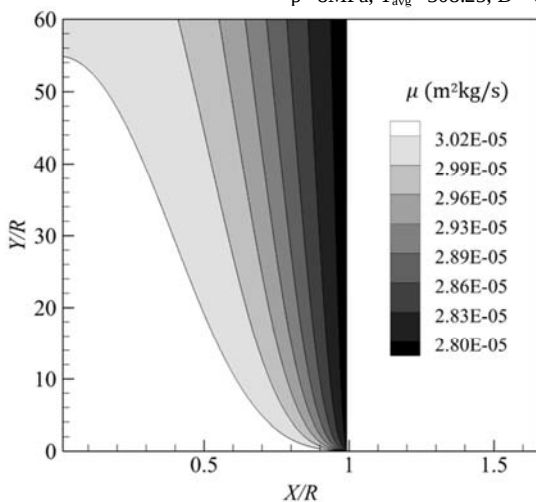


Fig. 23 Calculated contour of viscosity for carbon dioxide, $\Delta T=3$, $p=8\text{MPa}$, $T_{\text{avg}}=308.25$, $D=0.3\text{mm}$

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

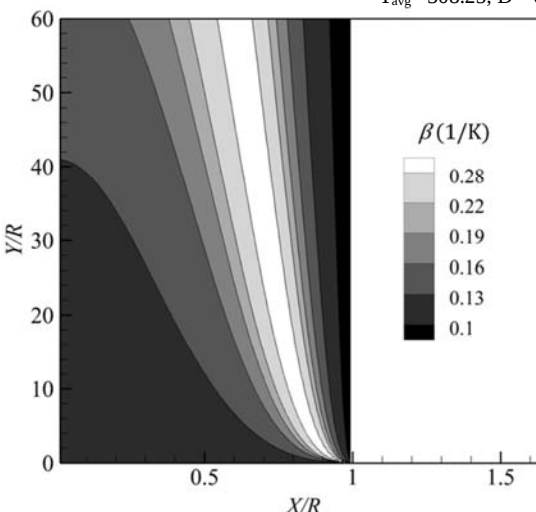


Fig. 24 Calculated contour of thermal expansion coefficient for carbon dioxide, $\Delta T=3$, $p=8\text{MPa}$, $T_{\text{avg}}=308.25$, $D=0.3\text{mm}$

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

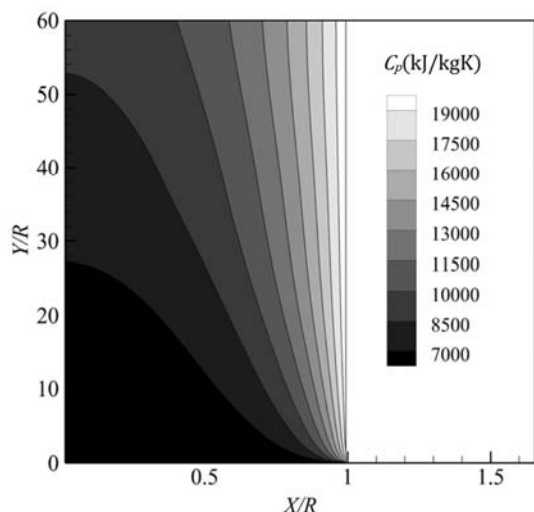


Fig. 29 Contour of special heat capacity at constant pressure for carbon dioxide, $\Delta T=3$, $p=8\text{MPa}$, $T_{\text{avg}}=305.5$, $D=0.3\text{mm}$

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

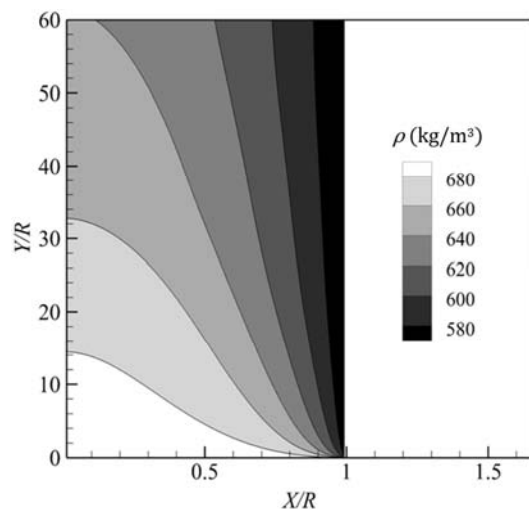


Fig. 30 Calculated contour of density for carbon dioxide, $\Delta T=3$, $p=8\text{MPa}$, $T_{\text{avg}}=305.5$, $D=0.3\text{mm}$

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

6- نتیجه گیری

انتقال حرارت جابجایی آزاد و آرام دی اکسید کربن فوق بحرانی درون لوله عمودی به روش عددی بررسی شد. مدل عددی در حالت غیر بحرانی انطباق خوبی با نتایج آزمایشگاهی انبساط نشان داد و با در نظر گرفتن تغییرات کلیه خواص، انتقال حرارت جابجایی آزاد دی اکسید کربن فوق بحرانی در لوله با موفقیت شبیه سازی شد. نتایج به دست آمده در حالت فوق بحرانی افزایش قابل توجه میزان انتقال حرارت نسبت به گاز کامل را نشان می دهند، 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 ایده آل 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 شکل های 27 تا 30 کانتورهای چگالی، ظرفیت گرمایی و دما برای دو حالت با ناسلت کمتر جهت مقایسه با کانتورهای قبلی رسم شده اند. با فاصله گرفتن دمای متوسط از دمای شبه بحرانی سیال، تغییرات خواص کمتر می شوند که منجر به کاهش میزان انتقال حرارت و در نهایت نزدیک شدن رفتار سیال به گاز ایده آل می شود.

جابجایی طبیعی سیال فوق بحرانی به موقعیت دمای متوسط نسبت به دمای شبه بحرانی وابستگی زیادی دارد. در شکل های 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 دی اکسید کربن فوق بحرانی با گاز ایده آل به کمترین مقادیر خود می رسد. در شکل های 29 و 30 قبل از دمای شبه بحرانی تغییرات خواص برعکس دو شکل قبلی هستند و شباهت خواص سیال به مایعات اختلاف قابل توجه انتقال حرارت با گاز ایده آل را توجیه می کند.

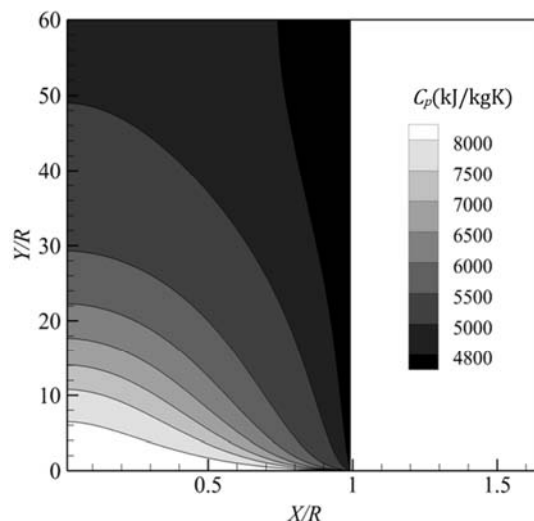


Fig. 27 Contour of special heat capacity at constant pressure for carbon dioxide, $\Delta T=3$, $p=8\text{MPa}$, $T_{\text{avg}}=312$, $D=0.3\text{mm}$

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

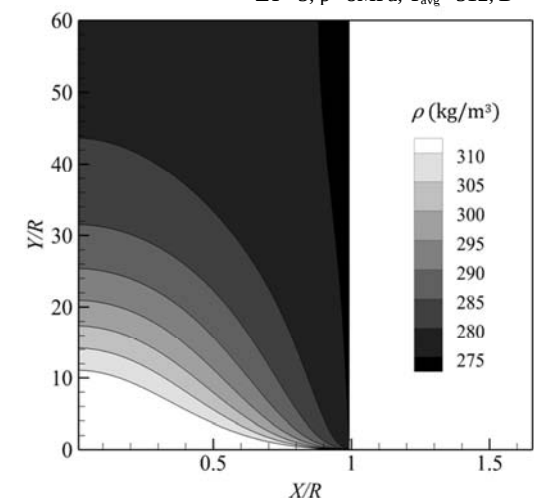


Fig. 28 Calculated contour of density for carbon dioxide, $\Delta T=3$, $p=8\text{MPa}$, $T_{\text{avg}}=312$, $D=0.3\text{mm}$

شکل 28 کانتور به دست آمده برای چگالی دی اکسید 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. Sunden, 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. Raveshi, 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 Quééré, R. Li, D. Saury, A. Sergent, 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. Raveshi, 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 ایده آل 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	آنتالپی (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 دی اکسید کربن ($JK^{-1}mol^{-1}$)
Ra	عدد رابلی
T	دما (K)
t	زمان (s)
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})
بالانویس ها	
*	تغییر یافته
o	ایده آل
r	مانده
زیرنویس ها	
ave	مقدار متوسط
c	بحرانی
in	ورودی
pc	شبه بحرانی
pc	شبه کاهش یافته
r	کاهش یافته
w	دیوار

8- مراجع

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