

# تحلیل رفتار حرارتی سیالات کرایوژنیک در نواحی نزدیک - بحرانی درون کانال های خنک کاری

عباس ابراهیمی\* (استادیار)

مریم شکری (دانشجوی دکتری)

دانشکده ی مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی شریف

مهندسی مکانیک شریف، (بهار ۱۳۹۸)  
دوری ۳-۳۵، شماره ۱، ص. ۲۳-۳۱

در پژوهش حاضر، رفتار حرارتی متان و هیدروژن در رژیم گذر بحرانی در کانال های خنک کاری به صورت عددی تحلیل شده است. این سیالات با فشار فوق بحرانی و دمای زیر بحرانی وارد مجرای خنک کاری شده و با گرفتن گرما از دیواره داغ با دمای فوق بحرانی از کانال خارج می شوند. حلگری (Solver) با استفاده از توسعه ی برنامه نویسی شی گراء ++C در نرم افزار این قوم تدوین شده که مبتنی بر روش حجم محدود است. روابط خواص ترمودینامیکی و انتقال متناسب با شرایط سیال خنک کننده در رژیم گذر بحرانی ارائه شده است. همچنین به دلیل اهمیت پدیده های نزدیک دیواره در کانال های خنک کننده، دقت الگوهای آشفتگی مختلف بررسی شده است. اعتبارسنجی مدل های به کار گرفته شده با استفاده از داده های تجربی هیدروژن در مجرای دایروی انجام شده است. نتایج نشان می دهد که شروع و محدوده ی افت انتقال حرارت، با محدوده ی تغییرات شدید خواص انتقال و دمای دیواره مطابقت دارد. همچنین، اثر دبی جرمی و دمای دیواره بر رفتار حرارتی سیال (مانند افت انتقال حرارت و تغییر حالت سیال) نشان داده شده است.

واژگان کلیدی: گذر بحرانی، فوق بحرانی، افت انتقال حرارت، معادله ی حالت گاز واقعی، سیال کرایوژنیک.

## ۱. مقدمه

می شود. بنابراین تحلیل حرارتی آن در کانال های خنک کاری بازاریابی برای بهینه کردن طراحی، افزایش کارایی و بهبود عمر زیرسامانه های پیشران حیاتی است. پیچیدگی های زیادی در تحلیل جریان درون کانال خنک کاری وجود دارد. سیال خنک کننده در حین عبور از مسیرهای خنک کاری با شارهای حرارتی زیاد، تغییر حالت داده و خواص آن وابسته به دما و فشار تغییر می کنند. همچنین به دلیل گرادیان دمای بالای نزدیک دیواره، عدد رینولدز بالا و هندسه ی سه بعدی مسیرها، سیال خنک کننده با پدیده هایی از جمله تغییر رژیم و افت انتقال حرارت مواجه خواهد شد. بنابراین شبیه سازی جریان خنک کننده نیازمند معادله ی حالت و روابط خواص انتقال خاص است. مطالعات تجربی اندکی در رابطه با رفتار حرارتی سیالات خنک کننده کرایوژنیک (نظیر هیدروژن، [۴] اکسیژن [۵] و متان [۸-۶]) در رژیم گذر بحرانی انجام شده است که در تمامی این تحقیقات بر اهمیت بررسی تغییر رژیم سیال خنک کننده و افت انتقال حرارت در تحلیل حرارتی موتورهای تأکید شده است. در این تحقیقات اطلاعات و داده های آزمایشگاهی کافی برای بررسی شرایطی که در آن سیال خنک کننده تغییر رژیم داده و انتقال حرارت دچار افت می شود، ارائه نشده است.

مطالعات عددی بسیاری برای تحلیل حرارتی سیالات خنک کننده در رژیم گذر بحرانی انجام شده است. [۹-۱۶] در میان این مطالعات، تعداد کمی از تحلیل های

یکی از چالش های حاضر در صنایع پرتاب حامل های فضایی، هزینه های بالای عملیاتی است. اخیراً ترکیب پیشران های اکسیژن - متان در طراحی سامانه های پیشران حامل های فضایی برای کاهش هزینه ها و ایمنی عملیات پرتاب بسیار مورد توجه قرار گرفته است. متان در مقایسه با پیشران های دیگر دارای ضربه ی ویژه بالاتر، حجم ذخیره سازی کم تر و دوده کم تری است. همچنین پژوهش ها نشان می دهند استفاده از این ترکیب پیشران در حامل های فضایی با قابلیت بازاریابی ساده تر است. [۱] در سامانه های پیشران متان - پایه کنترل بارهای حرارتی سازه ی موتور اهمیت زیادی دارد. خنک کاری بازاریابی معمولاً به عنوان روش خنک کاری مؤثری در سیستم های پیشران مایع استفاده می شود. [۲] در این رویکرد سیال پیشران با عبور از کانال های خنک کاری تعبیه شده روی بدنه موتور، گرما را جذب می کند. تحلیل حرارتی سیال خنک کننده برای پیش بینی خواص ترمودینامیکی آن و همچنین طراحی اجزای موتور (مانند پمپ های تزریق پیشران و انژکتور) بسیار مهم است. متان که سیالی گذر بحرانی است با عبور از کانال های خنک کاری دچار تغییرات شدید در متغیرهای ترمودینامیکی

\* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۶/۲/۲۰، اصلاحیه ۱۳۹۶/۵/۱۶، پذیرش ۱۳۹۶/۷/۱۷.

DOI:10.24200/J40.2018.10779.1425

حرارتی سیال خنک‌کننده در شارهای حرارتی بالا انجام شده و پدیده‌ی افت انتقال حرارت مشاهده شده است. [۱۶، ۱۵، ۱۰] داده‌های ارائه شده در مطالعات انجام شده [۱۰] مربوط به آب فوق‌بحرانی بوده و در پیزارلی [۱۶، ۱۵] نیز با روش CFD و بر اساس معادله‌ی حالت بندیکت - وب - روبین و مدل آشفتگی اسپالارت - آلمارس رفتار حرارتی هیدروژن و متان را در رژیم گذر بحرانی درون کانالی دایروی شبیه‌سازی کرده است.

شبیه‌سازی ارائه شده در مطالعات پیشین دارای خطاهای زیادی با داده‌های تجربی بوده که ناشی از ضعف معادله‌ی حالت، روابط انتقال و مدل آشفتگی استفاده شده در آن‌ها برای رژیم گذر بحرانی است. همچنین در هر سیال، شرایط تغییر حالت و شروع افت انتقال حرارت متفاوت بوده و وابسته به پارامترهای متنوعی چون هندسه‌ی کانال، خنک‌کاری، میزان شار حرارتی، دبی سیال خنک‌کننده، میزان آشفتگی جریان است. بنابراین شناسایی پدیده‌های درون کانال‌های خنک‌کاری و بررسی اثر تغییر پارامترهای جریان بر رفتار حرارتی سیال خنک‌کننده‌ی کربوهیدراتی، نیازمند تحقیقات بیشتری است. در این پژوهش، معادلات حالت و روابط انتقال برای تخمین دقیق پارامترهای ترمودینامیکی متان در رژیم‌های مختلف ارائه شده است. همچنین حالگری با استفاده از توسعه‌ی برنامه‌نویسی شی‌گرا ++C در نرم‌افزاری تجاری تدوین شده و رفتار حرارتی جریان‌های خنک‌کننده‌ی متان درون کانال مستطیلی و هیدروژن درون کانال دایروی در رژیم گذر بحرانی شبیه‌سازی شده است. دقت مدل‌های مختلف آشفتگی در تسخیر پدیده‌های نزدیک دیواره با یکدیگر مقایسه، و نتایج حاصل با نتایج به دست آمده در کارهای هندریکز [۳] و پیزارلی [۱۶، ۱۳] اعتبارسنجی شده است. پدیده‌های افت انتقال حرارت و تغییر رژیم سیال خنک‌کننده از طریق بررسی رفتار ظرفیت گرمایی ویژه، خواص انتقال و پارامترهای ترمودینامیکی سیال خنک‌کننده تحلیل شده است. همچنین اثر تغییر دبی جرمی سیال خنک‌کننده و دمای دیواره کانال خنک‌کاری بر رفتار حرارتی سیال خنک‌کننده بررسی شده است.

## ۲. فیزیک سیال خنک‌کننده درون کانال‌های خنک‌کاری

سیال خنک‌کننده در تمام مسیر خنک‌کاری فشاری بالاتر از مقدار بحرانی داشته و در حین عبور از این مسیرها، دمای زیر بحرانی آن با گرفتن گرما از دیواره‌ی کانال به مقدار فرابحرانی می‌رسد. در حین عبور از دمای شبه‌بحرانی، مشخصات ترمودینامیکی سیال به شدت تغییر می‌کند. [۱۹] رژیم ترمودینامیکی که سیال این تغییرات را در خواص خود مشاهده می‌کند به عنوان رژیم گذر بحرانی شناخته می‌شود. در جدول ۱ مقادیر بحرانی متان و هیدروژن ارائه شده است.

## ۳. معادله‌ی حالت و روابط خواص انتقال متان و

### هیدروژن در رژیم گذر بحرانی

گام اصلی در شبیه‌سازی و تحلیل حرارتی متان و هیدروژن، بررسی معادلات حالت،

جدول ۱. مقادیر بحرانی متان و هیدروژن.

چگالی بحرانی (kg/m <sup>۳</sup> )	دمای بحرانی (k)	فشار بحرانی (MPa)
۱۶۲٫۷	۱۹۰٫۵	۴٫۶
۳۱٫۳	۳۳٫۱	۱٫۳

روابط ترمودینامیکی و خواص انتقالی است که قادر به مدل کردن تغییرات خواص جریان خنک‌کننده در رژیم‌های گذر بحرانی و فوق‌بحرانی باشند.

در این پژوهش برای شبیه‌سازی رفتار حرارتی متان از معادله‌ی حالت و ظرفیت گرمایی ویژه کاز و واگنر [۱۷] به ترتیب مطابق روابط ۱ و ۲ استفاده شده است. درصد خطای معادله‌ی حالت کاز و واگنر برای محاسبه‌ی چگالی کم‌تر از ۰٫۱ درصد، سرعت صوت کم‌تر از ۰٫۱ درصد، آنتالپی ۰٫۲ درصد و ظرفیت گرمایی برابر با ۱ درصد است.

$$\alpha(\tau, \delta) = \alpha^o(\tau, \delta) + \alpha^r(\tau, \delta) \quad (۱)$$

$$\alpha^o(\tau, \delta) = \frac{R^*}{R} [In(\delta) + n_{id,1} + n_{id,2}\tau + n_{id,3}\ln(\tau) + \sum_{k=2,6} n_{id,k} \ln |\sinh(\theta_{id,k}\tau)| - \sum_{k=0,7} n_{id,k} \ln |\cosh(\theta_{id,k}\tau)|] \quad (۲)$$

$$\alpha^r(\tau, \delta) = \sum_{k=1}^6 n_{r,k} \delta^{d_{r,k}} \tau^{t_{r,k}} + \sum_{k=1}^6 n_{r,k} \delta^{d_{r,k}} \tau^{t_{r,k}} e^{-\delta c_{r,k}} \quad (۳)$$

$$\frac{C_p(\delta, \tau)}{R} = -\tau^r (\alpha_{\tau-\tau}^o + \alpha_{\tau\tau}^r) + \frac{(1 + \delta \alpha_{\delta}^o - \delta \tau \alpha_{\delta\tau}^r)^r}{1 + 2\delta \alpha_{\delta}^o + \delta^2 \alpha_{\delta\delta}^o} \quad (۴)$$

که در آن  $\alpha = \frac{a}{RT}$  نشان‌دهنده‌ی شکل بی‌بعد انرژی هلمهولتز ویژه است که تابعی از دما ( $\tau$ ) و چگالی ( $\rho$ ) است.  $\alpha^o$  و  $\alpha^r$  در رابطه‌های ۱ و ۲، به ترتیب نشان‌دهنده‌ی خواص گاز ایده‌آل و رفتار گاز واقعی است.  $\tau = \frac{T_p}{T_c}$  و  $\delta = \frac{\rho}{\rho_{cr}}$  به ترتیب چگالی و عکس دمای کاهش‌یافته‌ی سیال هستند. در رابطه‌های ۲ و ۳ اختصارات  $n_{id,k}$ ،  $\theta_{id,k}$ ،  $n_{r,k}$ ،  $d_{r,k}$ ،  $t_{r,k}$ ،  $c_{r,k}$  و  $R$  نشان‌گر ضرایب ثابتی هستند که در مطالعات مربوطه [۱۷] آورده شده است. در رابطه‌ی ۴،  $\alpha_{\delta\delta}^o$ ،  $\alpha_{\delta\tau}^o$ ،  $\alpha_{\delta}^o$ ،  $\alpha_{\tau\tau}^r$ ،  $\alpha_{\tau\tau}^o$  و  $\alpha_{\delta\tau}^r$  مشتقات  $\alpha^o$  و  $\alpha^r$  نسبت به  $\delta$  و  $\tau$  هستند. همچنین خواص انتقال شامل ضریب هدایت حرارتی از مرجع [۱۸] (رابطه‌ی ۵) و ضریب لزجت [۱۹] (رابطه‌ی ۶) استخراج شده است.

$$k(\tau, \delta) = k_o(\tau) + \Delta k(\tau, \delta) + k_c(\tau, \delta) \quad (۵)$$

$$k_o(\tau) = 1000 \eta_o (C_p^o - \frac{5}{4} R) G_t(1) + 0.100 \Delta G_t(2) \epsilon \tau / \kappa$$

$$\mu = \mu_o(\tau) + \mu_f(\tau, \delta) \quad (۶)$$

$$\mu_o(\tau) = (d_o + d_1 \tau^{-1/2} + d_2 \tau^{-1/2} + d_3 \tau^{-2/2} + d_4 \tau^{-1})$$

در روابط ۵ و ۶،  $k_o$  و  $\mu_o$  معرف توزیع در محدوده‌ی گاز رقیق،  $\mu_f$  معرف جمله‌ی لزجت،  $\Delta k$  معرف جمله‌ی اضافی به دلیل گاز واقعی بودن متان و  $k_c$  معرف تغییر بحرانی در نواحی نزدیک به مقادیر بحرانی است. همچنین روابط و ثابت‌های مورد استفاده در روابط ۵ و ۶ قابل دسترسی است. [۱۹، ۱۸]

## ۴. معادلات حاکم و الگوریتم حل عددی

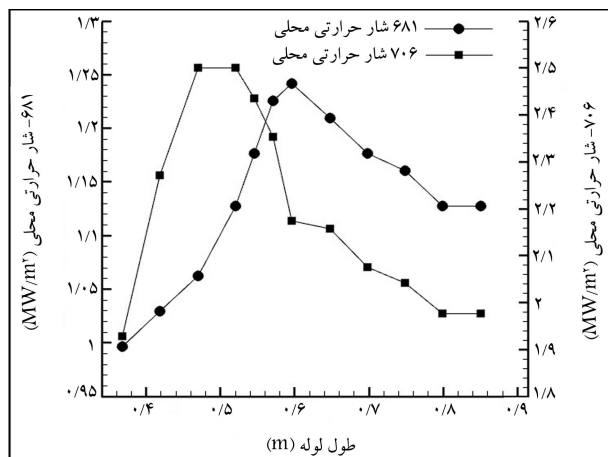
برای شبیه‌سازی جریان سیال از معادلات سه‌بعدی تراکم‌پذیر ناویر - استوکس متوسط‌گیری شده به روش رینولدز، به همراه معادله‌ی انرژی استفاده شده است. معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی در رابطه‌های ۷ تا ۹ ارائه شده است:



شکل ۱. هندسه‌ی کانال دایروی مورد آزمایش.

جدول ۲. ابعاد کانال دایروی در آزمون‌های ۷۰۶ و ۶۸۱ [۳].

$L_2$ (طول گرم شده)	۶۱۰ mm
$L_1$ (طول گرم نشده)	۳۰۴/۴ mm
$D$ (قطر داخلی)	۸/۵۱ mm
قطر خارجی	۹/۵۲۵ mm
جنس	فولاد ضدزنگ ۳۰۴



شکل ۲. توزیع شار حرارتی اعمال شده بر دیواره‌ی خارجی لوله در آزمون‌های ۷۰۶ و ۶۸۱ [۳].

جدول ۳. شرایط مرزی در آزمون‌های ۷۰۶ و ۶۸۱.

شماره آزمون	دبی جرمی (kg/s)	دمای ورودی (K)	فشار خروجی (MPa)	متوسط شار حرارتی ( $MW/m^2$ )
۷۰۶	۰/۰۷۸	۲۶/۸	۴/۹	۲/۳۵
۶۸۱	۰/۰۸	۲۵/۰۵۶	۱/۶	۱/۲۳

جدول ۴. مقادیر  $y^+$  شبکه‌های محاسباتی کانال دایروی.

سایز شبکه	$y^+(x = 304/4 mm)$
شبکه‌ی درشت	۲/۸
شبکه‌ی متوسط	۱/۰۷
شبکه‌ی ریز	۰/۴۷

خانواده  $k - \omega$ ,  $y^+ < 2$  باشد. همچنین، برای بررسی استقلال نتایج از شبکه‌ی محاسباتی باید اثر ابعاد شبکه بر نتایج نیز بررسی شود. برای این منظور، سه شبکه‌ی محاسباتی درشت، متوسط و ریز با مشخصات ذکر شده در جدول ۴ در نظر گرفته شده است. نتایج توزیع دمای دیواره مربوط به آزمون ۷۰۶ با شبکه‌های محاسباتی مختلف در شکل ۳ ارائه و با داده‌های تجربی هندریکز [۳] نیز مقایسه شده است. با توجه به اختلاف ناچیز نتایج حاصل از شبکه‌ی متوسط و ریز، شبکه‌ی متوسط به عنوان شبکه‌ی محاسباتی بهینه انتخاب شده است.

برای انتخاب مدل آشفتگی مناسب برای جریان سیال خنک‌کننده، توزیع دمای

$$\frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{p} \tilde{u}_j}{\partial x_j} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial \bar{p} \tilde{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{p} \tilde{u}_i \tilde{u}_j)}{\partial x_j} = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{\tau}_{ij} - \overline{\rho u_i'' u_j''}) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\bar{\rho} \tilde{H}) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \bar{\rho} \tilde{u}_j \tilde{H} + \overline{\rho u_j'' H''} - k \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_j} \right) \\ = \frac{\partial \bar{p}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tilde{u}_i \bar{\tau}_{ij} + \overline{\tau_{ij} u_i''}) \end{aligned} \quad (9)$$

که در آنها  $\tilde{p}$  و  $\tilde{H}$  به ترتیب مؤلفه‌های سرعت، چگالی، فشار استاتیکی و آنالپی کل هستند. علائم  $(\sim)$  و  $(\tilde{\cdot})$  به ترتیب نشان‌دهنده‌ی متوسط‌گیری زمانی و جرمی هستند. همچنین  $\bar{\tau}_{ij}$  نشان‌دهنده‌ی تانسور تنش رینولدز است. [۲۰] در پژوهش حاضر، شبیه‌سازی عددی با استفاده از روش حجم محدود فشارپایه در نرم‌افزار این‌فوم انجام شده است. با توجه به متغیر بودن چگالی سیال خنک‌کننده، جریان به صورت تراکم‌پذیر در نظر گرفته شده و میدان‌های فشار و سرعت کوپل شده‌اند. برای گسسته‌سازی مکانی جمله‌های گرادیانی، از الگوریتم حداقل مربعات استفاده شده است. همچنین، در معادلات مومنتوم و انرژی از روش گسسته‌سازی مرکزی استفاده شده است. برای گسسته‌سازی زمانی نیز از روش ضمنی اویلر مرتبه اول استفاده شده است. جریان درون کانال به صورت ناپایا و متقارن در نظر گرفته شده است. به دلیل بالا بودن عدد رینولدز و آشفتگی بودن جریان خنک‌کننده، گرادیان شدید دما و سرعت در نزدیکی دیواره‌ی داغ، انتخاب مدل آشفتگی برای شبیه‌سازی رفتار حرارتی سیال خنک‌کننده اهمیت دارد. با توجه به فیزیک مسئله‌ی حاضر، مدل آشفتگی باید قادر باشد اتفاقات نزدیک دیواره را به خوبی مدل‌کنند. بررسی انجام شده روی مقالات [۱۶-۱۹] نشان می‌دهد که در چنین شرایطی، از مدل‌های مبتنی بر لزجت گردابه‌یی مانند اسپالارت - آلمارس [۲۱] و خانواده  $k - \omega$  [۲۲-۲۴] که روش‌هایی برای بهبود محاسبات در نزدیکی دیواره‌اند، استفاده می‌شود. برای گسسته‌سازی دو جمله‌ی انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اتلاف انرژی جنبشی در مدل‌های  $k - \omega$  و همچنین لزجت آشفتگی در مدل اسپالارت - آلمارس، از روش بالادست مرتبه دو استفاده شده است.

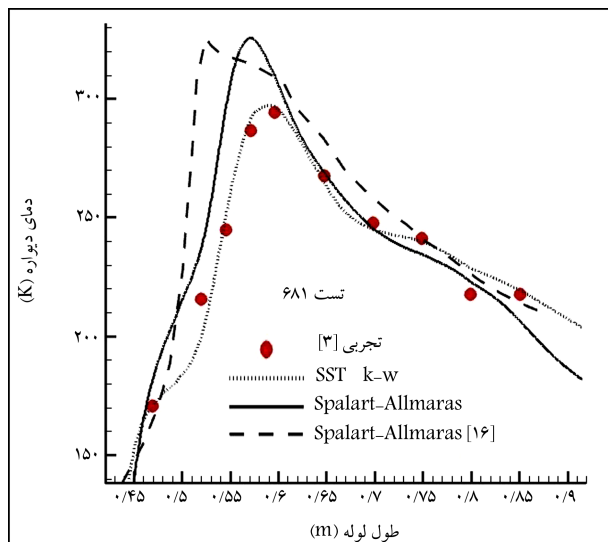
## ۵. اعتبارسنجی

برای اعتبارسنجی روش توسعه داده شده، هیدروژن درون کانال دایروی تحت شار حرارتی شبیه‌سازی شده است. و مطابق با شرایط دو آزمون ۷۰۶ و ۶۸۱ بررسی شده توسط هندریکز [۲] شبیه‌سازی شده است. در شکل ۱ هندسه، و در جدول ۲ ابعاد کانال دایروی مورد آزمایش ارائه شده است. برای توسعه‌ی جریان در کانال دایروی و از بین رفتن اثرات ورودی، ابتدا هیدروژن بدون اعمال حرارت از طول  $L_1$  عبور داده شده و سپس با اعمال شار حرارتی در طول  $L_2$  گرم می‌شود. نمودار توزیع شارهای حرارتی اعمال شده بر هیدروژن در شکل ۲ قابل مشاهده است. جریان هیدروژن درون کانال دایروی به صورت تقارن محوری و پایا شبیه‌سازی شده است. در هر دو آزمون، فشار هیدروژن به صورت فرابحرانی است و دمای آن از حالت زیربحرانی به فرابحرانی رسیده است. شرط مرزی در ورودی، دبی و در خروجی، فشار و دیواره‌ها با شرط عدم لغزش در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی و مقدار آن‌ها در جدول ۳ آمده است.

کیفیت شبکه‌ی محاسباتی در نزدیکی دیواره روی کارایی مدل‌های آشفتگی بسیار مؤثر است. پارامتر  $y^+$  به عنوان فاصله‌ی بی‌بعد از دیواره، معیار کیفیت شبکه در جریان آشفتگی بوده و باید در مدل اسپالارت - آلمارس،  $1 \sim y^+$  و در مدل‌های

جدول ۵. درصد خطای دمای دیواره در مدل‌های آشفتگی مختلف.

مدل آشفتگی	درصد خطا
Spalart – Allmaras [۱۶]	۱۱
Spalart – Allmaras	۶٫۸
Standard k – $\omega$	۲۶
SST k – $\omega$	۱٫۲



شکل ۵. مقایسه‌ی توزیع دمای دیواره‌ی مرجع [۱۶] و پژوهش حاضر.

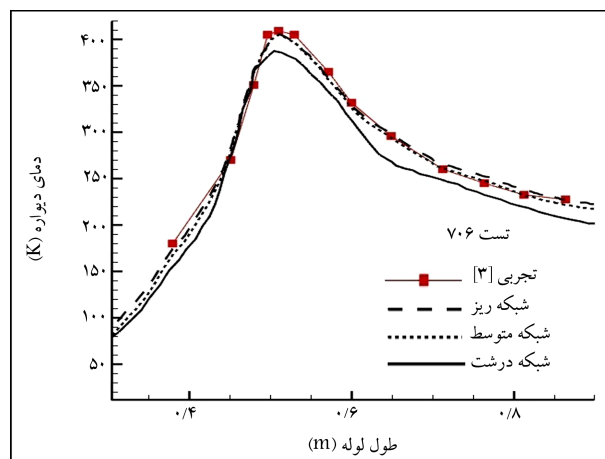
برای ارزیابی دقت معادله‌ی حالت [۱۷] و روابط خواص انتقالی [۱۹، ۱۸] انتخاب شده در پژوهش حاضر، نتایج توزیع دمای دیواره با نتایج عددی مرجع [۱۶] در شکل ۵ با یکدیگر مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی مرجع [۱۶] بر اساس مدل آشفتگی اسپالارت - آلمارس، معادله‌ی حالت بندیکت - وب - روبین و روابط خواص انتقال یانگلاو [۱۸] انجام شده است. بر اساس آنچه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، استفاده از معادله‌ی حالت کانزو و واگنر [۱۷] و روابط خواص انتقال مرجع [۱۹] به جای روابط یانگلاو در این پژوهش، باعث کاهش خطای نتایج مدل آشفتگی اسپالارت - آلمارس حدود ۵ درصد نسبت به مرجع [۱۶] شده است. علت بهبود نتایج حاضر، درصد خطای کم‌تر رابطه‌ی ظرفیت گرمایی کانزو و واگنر و رابطه‌ی لزجت مرجع [۱۹] نسبت به روابط یانگلاو در محدوده‌های کاری آزمون‌های ۷۰۶ و ۶۸۱ است.

## ۶. بررسی نتایج

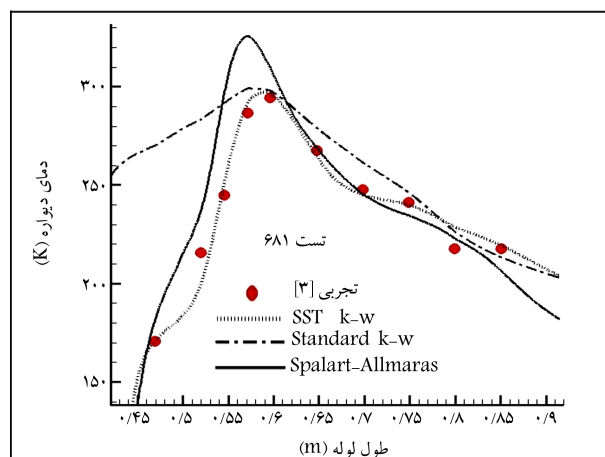
در این بخش به بررسی نتایج حاصل از شبیه‌سازی هیدروژن درون کانال دایروی و متان درون کانال مستطیلی پرداخته شده است.

### ۱.۶. هیدروژن درون کانال دایروی

برای شناسایی موقعیت تغییر حالت سیال خنک‌کننده (رژیم گذر بحرانی) در طول کانال، توزیع ظرفیت گرمایی در دی‌های جرمی مختلف در شکل ۶ ارائه شده است. ناحیه‌ی مربوط به تغییرات شدید  $C_p$ ، نشان‌دهنده‌ی محدوده‌ی رژیم گذر بحرانی و تغییر حالت هیدروژن از شبه مایع به شبه گاز است. با افزایش دی‌های جرمی هیدروژن،



شکل ۳. توزیع دمای دیواره در طول کانال دایروی مربوط به آزمون ۷۰۶.

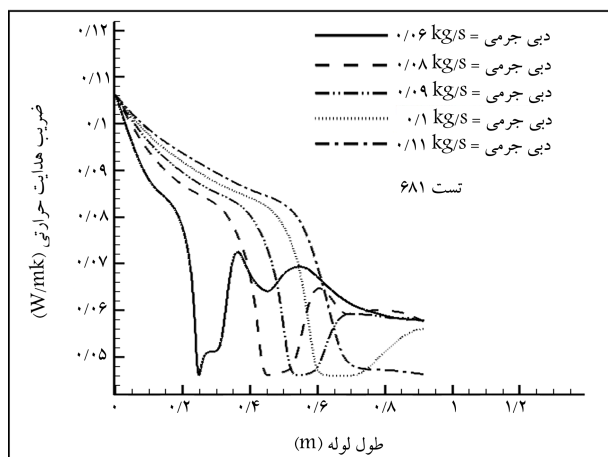


شکل ۴. توزیع دمای دیواره‌ی آزمون ۶۸۱ در مدل‌های آشفتگی مختلف.

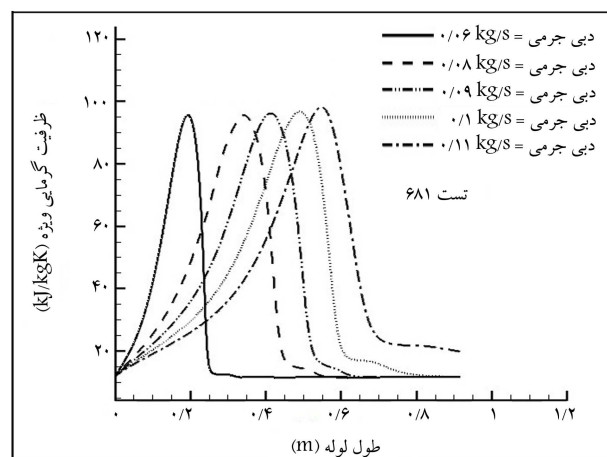
دیواره با مدل‌های مختلف آشفتگی در شکل ۴ مقایسه شده است. اختلاف توزیع دمای مدل‌های آشفتگی مختلف نسبت به داده‌های تجربی [۳] از رابطه‌ی ۱۰ محاسبه و نتایج در جدول ۵ ارائه شده است.

$$Error = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \left( \frac{X_{data} - X_{calc}}{X_{data}} \right) \right| \quad (10)$$

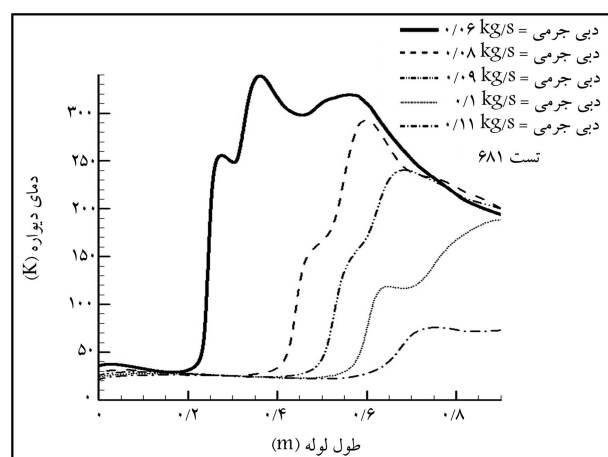
چنان که مشاهده می‌شود درصد خطای شبیه‌سازی با مدل آشفتگی  $SST k - \omega$  از سایر مدل‌ها کم‌تر بوده و پیش‌بینی روند تغییرات دما به وسیله‌ی آن تطابق خوبی با داده‌های تجربی دارد. این مدل در مقایسه با مدل  $Standard k - \omega$  حساسیت کم‌تری به شرایط جریان آزاد داشته (به دلیل استفاده از مدل  $Standard k - \varepsilon$  در خارج از لایه مرزی) و دقت بیشتری در نزدیکی دیواره دارد (به دلیل استفاده از مدل  $Standard k - \omega$  در نزدیکی دیواره). همچنین با اصلاح جمله‌های تولید در معادله‌ی انرژی جنبشی آشفتگی و در نظر گرفتن معادله‌ی انتقال برای تنش برشی آشفتگی، لزجت گردابه‌ی را بهتر محاسبه می‌کند. مدل اسپالارت - آلمارس از یک معادله‌ی انتقال برای لزجت گردابه‌ی استفاده می‌کند و به ابعاد شبکه در نواحی نزدیک به دیواره وابسته است. لذا در این پژوهش برای شبیه‌سازی دقیق‌تر پدیده‌های جریان خنک‌کننده در رژیم گذر بحرانی از مدل  $SST k - \omega$  و برای رسیدن به حل‌های تقریبی و درک رفتار کلی جریان آشفته درون کانال از مدل اسپالارت - آلمارس استفاده شده است.



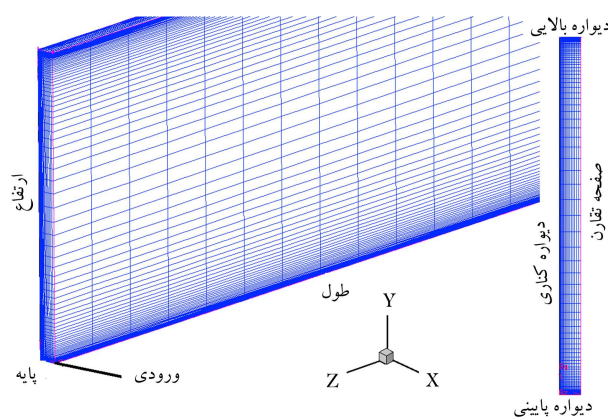
شکل ۷. توزیع ضریب هدایت حرارتی هیدروژن در طول کانال دایروی در دبی های جرمی مختلف.



شکل ۸. توزیع ظرفیت گرمایی هیدروژن در طول کانال دایروی در دبی های جرمی مختلف.



شکل ۹. توزیع دمای دیواره در طول کانال دایروی در دبی های جرمی مختلف.



شکل ۱۰. هندسه و شبکه‌ی محاسباتی کانال مستطیلی مورد آزمایش.

جدول ۶. شرایط مرزی متان در کانال مستطیلی.

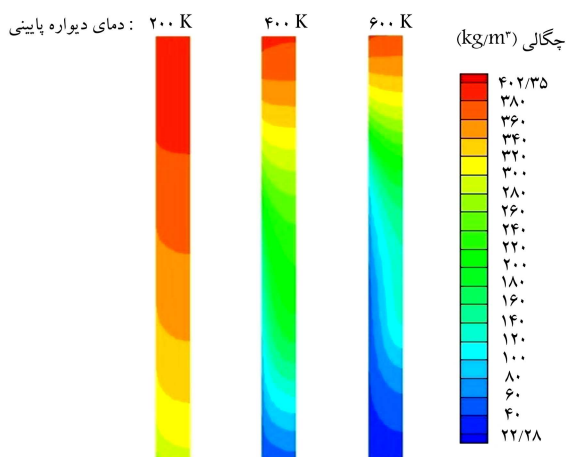
دمای دیواره بالایی (K)	دمای دیواره پایینی (K)	فشار خروجی (MPa)	فشار ورودی (MPa)
۱۳۰	۶۰۰	۷	۹

رژیم گذر بحرانی دیرتر اتفاق افتاده و بازه‌ی آن افزایش یافته است. برای شناسایی شروع پدیده افت انتقال حرارت در طول کانال، توزیع ضریب هدایت حرارتی و دمای دیواره در دبی های جرمی مختلف به ترتیب در شکل های ۷ و ۸ ارائه شده است. به طور کلی با گرم شدن سیال هیدروژنی، ضریب هدایت حرارتی کاهش و دمای دیواره افزایش می یابد. همان طور که مشاهده می شود، در برخی نواحی ضریب هدایت حرارتی افزایش یافته است. در این نواحی، با افت ضریب انتقال حرارت، میزان حرارت منتقل شده از دیواره به سیال خنک کننده کاهش و ضریب هدایت حرارتی سیال افزایش می یابد. این نواحی نشان دهنده‌ی محدوده‌ی افت انتقال حرارت هستند. با افزایش دبی جرمی جریان هیدروژن، افت انتقال حرارت دیرتر اتفاق افتاده و بازه‌ی آن کاهش یافته است. ناحیه‌ی افت انتقال حرارت معادل طولی از کانال دایروی بوده که در آن ضریب  $h$  افزایش می یابد.

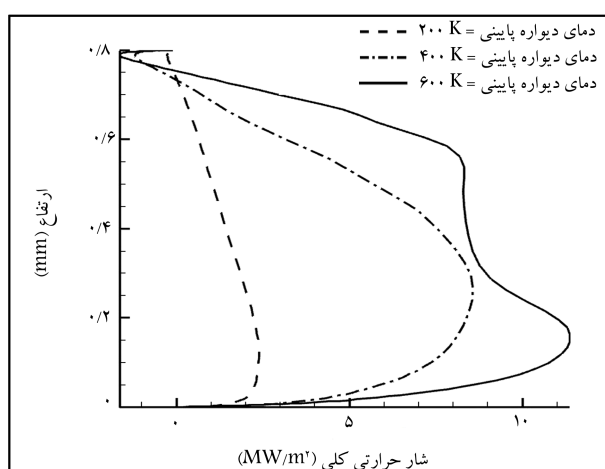
## ۲.۶. متان درون کانال مستطیلی

متان درون کانال مستطیلی با ابعاد  $30 \times 8 \times 1$  میلی متر مطابق با شرایط مدل بررسی شده توسط مرجع [۱۳] شبیه سازی شده است. در شکل ۹ هندسه و کیفیت شبکه‌ی محاسباتی کانال مستطیلی نشان داده شده است. جریان متان درون این کانال به صورت سه بعدی، ناپایا و به دلیل مقارن بودن هندسه و شرایط مرزی سیال خنک کننده، در نیمی از کانال شبیه سازی شده است.

در کانال مستطیلی، فشار متان به صورت فرابحرانی بوده و دمای آن از حالت زیر بحرانی به فرابحرانی رسیده است. شرط مرزی در ورودی و خروجی، فشار و در دیواره های بالا و پایین، دما و دیواره ها با شرط عدم لغزش در نظر گرفته شده است. توزیع دما در دیواره‌ی کناری نیز به صورت خطی از دیواره‌ی پایینی تا بالایی فرض شده است. شرایط مرزی و مقدار آن ها در جدول ۶ آمده است. برای تسخیر پدیده های نزدیک دیواره، شبکه‌ی با  $y^+ \sim 1$ ، برای دو مدل اسپالارت - آلمارس و  $w - SSTk$  استفاده شده است. همچنین برای بررسی استقلال نتایج از شبکه‌ی محاسباتی، چهار شبکه‌ی محاسباتی درشت، متوسط، ریز و خیلی ریز با مشخصات جدول ۷ در نظر گرفته شده است. نتایج توزیع شار حرارتی جریان متان با شبکه های محاسباتی مختلف در شکل ۱۰ ارائه شده است. باتوجه به اختلاف ناچیز نتایج حاصل از شبکه‌ی ریز و خیلی ریز، شبکه‌ی ریز به عنوان شبکه‌ی محاسباتی بهینه انتخاب شده است.



شکل ۱۲. کانتور چگالی متان در خروجی کانال مستطیلی برای دماهای متفاوت دیواره‌ی پایینی.



شکل ۱۳. توزیع شار حرارتی متان روی دیواره‌ی کناری در خروجی کانال مستطیلی برای دماهای متفاوت دیواره‌ی پایینی.

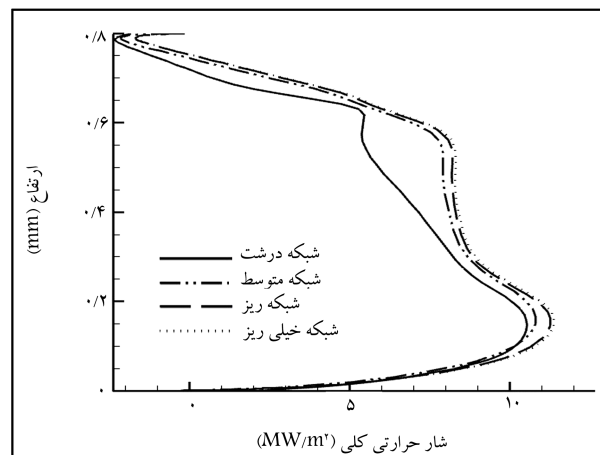
کلون، فاز متان در تمامی کانال به صورت شبه مایع است ولی در دماهای ۴۰۰ و ۶۰۰ کلون، به دلیل بروز رژیم گذر بحرانی، هر دو فاز شبه مایع و شبه گاز وجود دارد. همچنین ناحیه‌ی شبه گازی با دورتر شدن از دیواره‌ی کناری کوچک تر شده و در وسط کانال ضخامت کمتری نسبت به گوشه‌های کانال دارد. در شکل ۱۳ توزیع شار حرارتی دیواره‌ی کناری برای سه دمای متفاوت دیواره‌ی پایینی ارائه شده است. با افزایش دمای دیواره پایینی، شار حرارتی روی دیواره کناری نیز افزایش یافته است. همچنین شار حرارتی در دماهای ۴۰۰ و ۶۰۰ کلون، به دلیل وجود لایه گازی (چگالی کم) دارای بیشترین مقدار در نزدیکی دیواره‌ی پایینی است.

برای شناسایی موقعیت رژیم گذر بحرانی (تغییر حالت سیال خنک کننده) در دمای دیواره‌ی پایینی مختلف، توزیع چگالی و ظرفیت گرمایی متان نزدیک دیواره‌ی کناری در شکل ۱۴ نشان داده شده است. ارتفاع متناظر با مقدار بیشینه‌ی ظرفیت گرمایی و یا ناحیه‌ی اطراف نقطه‌ی عطف نمودار چگالی، نشان دهنده‌ی ناحیه‌ی رژیم گذر بحرانی هستند. چنان که مشاهده می‌شود با افزایش دمای دیواره‌ی پایینی، تغییر حالت سیال خنک کننده در ارتفاع بالاتری اتفاق افتاده است.

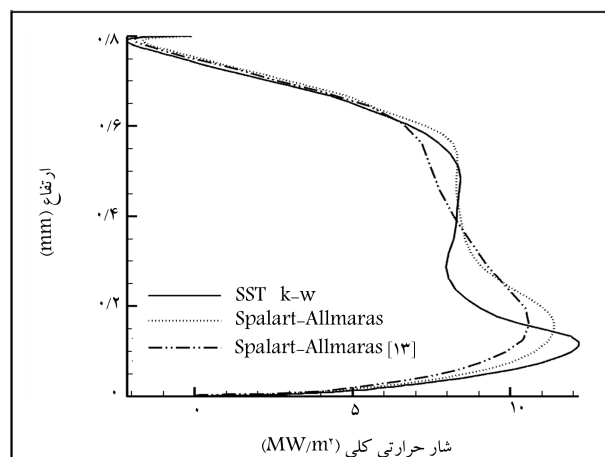
برای شناسایی موقعیت شروع افت انتقال حرارت در سه دمای متفاوت دیواره‌ی پایینی، توزیع سرعت در راستای جریان و لزجت مولکولی متان نزدیک دیواره کناری

جدول ۷. مقادیر  $y^+$  شبکه‌های محاسباتی کانال مستطیلی.

سایز شبکه	$y^+ (X = 0/100 \text{ mm})$
شبکه‌ی درشت	$4/2$
شبکه‌ی متوسط	$1/48$
شبکه‌ی ریز	$0/73$
شبکه‌ی خیلی ریز	$0/3$



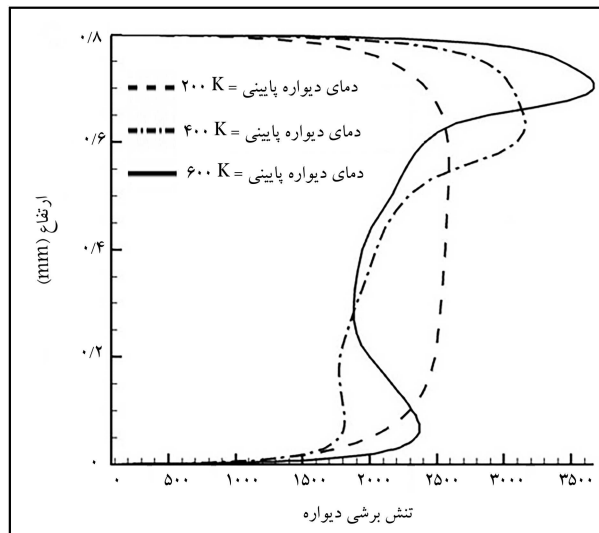
شکل ۱۰. توزیع شار حرارتی متان روی دیواره‌ی کناری در خروجی کانال مستطیلی.



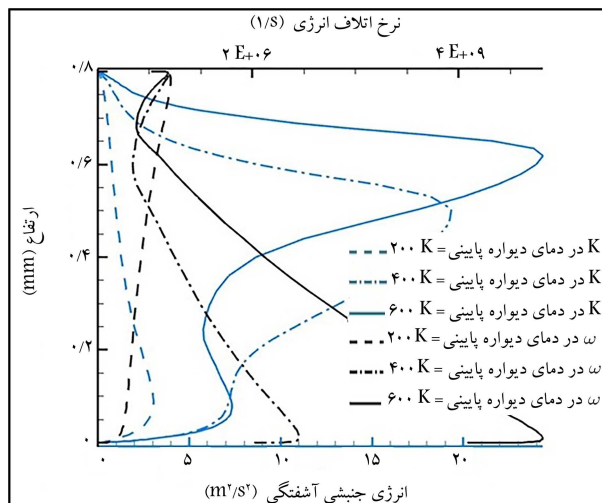
شکل ۱۱. توزیع شار حرارتی متان روی دیواره‌ی کناری در خروجی کانال مستطیلی.

نتایج توزیع شار حرارتی روی دیواره‌ی کناری در خروجی کانال توسط دو مدل اسپالارت - آلمارس و  $SSTk - \omega$ ، با نتایج عددی مرجع، [۱۳] در شکل ۱۱ مقایسه شده است. با توجه به جدول ۵، دقت مدل آشفتگی  $SSTk - \omega$  در شبیه سازی رفتار حرارتی سیال خنک کننده در نزدیک دیواره بیشتر است. مطابق شکل ۱۱، پروفیل شار حرارتی حاصل از مدل آشفتگی اسپالارت - آلمارس در پژوهش حاضر، حدود ۳ درصد از مدل مشابه در مطالعات دیگر [۱۳] به نتایج  $SSTk - \omega$  نزدیک تر است. علت بهبود نتایج، انتخاب معادله‌ی حالت و روابط خواص انتقالی با دقت بالاتر است. شار حرارتی در گوشه‌های کانال به دلیل شرایط مرزی دیواره صفر شده است. همچنین تداخل لایه‌ی مرزی دیواره‌ها در گوشه‌ها باعث کاهش گرادیان دما و شار حرارتی شده است.

کانتور چگالی متان در خروجی کانال مستطیلی برای سه دمای متفاوت دیواره‌ی پایینی، در شکل ۱۲ ارائه شده است. چنان که مشاهده می‌شود در دمای ۲۰۰



شکل ۱۶. توزیع تنش برشی متان روی دیواره کناری در خروجی کانال مستطیلی.

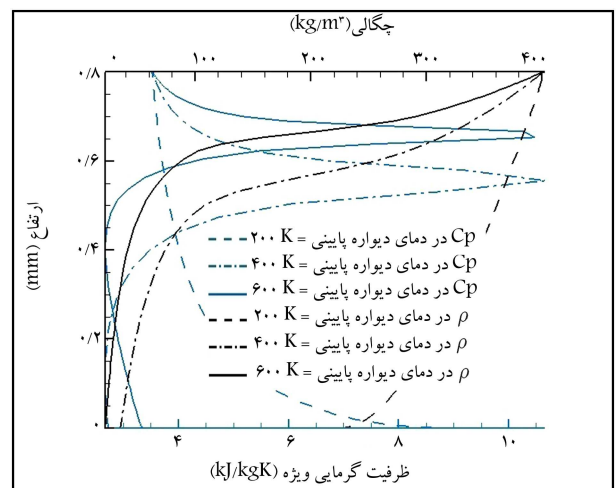


شکل ۱۷. توزیع انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اتلاف انرژی نزدیک دیواره کناری در خروجی کانال مستطیلی.

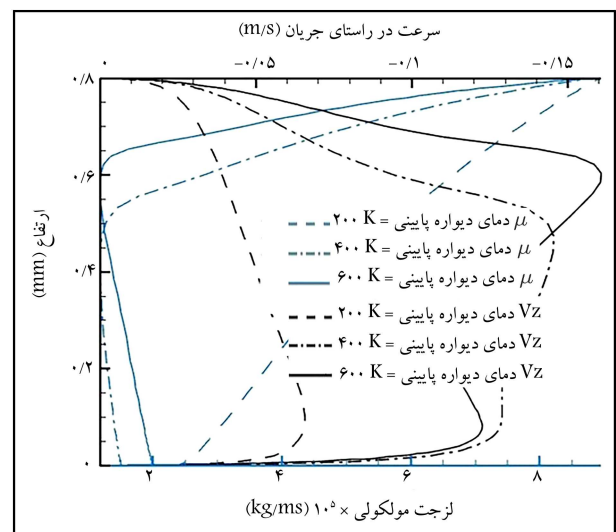
(نزدیک دیواره بالایی) دارای مقادیر بیشینه‌ی محلی است. در نزدیک دیواره‌ها، به دلیل بالا بودن تولید و اتلاف انرژی، نرخ اتلاف انرژی جنبشی نیز افزایش یافته است.

## ۷. نتیجه‌گیری

به دلیل ناشناخته بودن رفتار حرارتی سیالات گذر بحرانی در کانال‌های خنک‌کاری، لازم است که روشی متناسب با این شرایط شامل انتخاب مناسب روابط ترمودینامیکی، خواص انتقالی و مدل آشفتگی توسعه داده شود. همچنین، با توجه به این که تاکنون پیش‌رانی با سوخت متان عملیاتی نشده است، داده‌های واقعی برای اعمال شرط مرزی به صورت توزیع دمای دیواره یا شار حرارتی وجود ندارد. برای شبیه‌سازی مسئله انتقال حرارت در شرایط نزدیک به واقعیت لازم است انتقال حرارت کوپل از محفظه به دیواره و دیواره به سیال خنک‌کننده در نظر گرفته شود که هدف گام‌های بعدی این پژوهش هستند. در این پژوهش به بررسی رفتار حرارتی هیدروژن و متان در شرایط



شکل ۱۴. ظرفیت گرمایی و چگالی متان نزدیک دیواره کناری در خروجی کانال مستطیلی.



شکل ۱۵. توزیع سرعت در راستای جریان و لزجت مولکولی متان نزدیک دیواره کناری در خروجی کانال مستطیلی.

در شکل ۱۵ بررسی شده است. ارتفاع متناظر با تغییر شیب نمودار لزجت مولکولی متناظر با ناحیه‌ی شروع افت انتقال حرارت است. با افزایش دمای دیواره پایینی، افت انتقال حرارت در ارتفاع بالاتر اتفاق افتاده است. با افزایش شار حرارتی و انرژی جریان خنک‌کننده، سرعت جریان افزایش و لزجت آن کاهش یافته است و بالعکس. همچنین در نزدیکی دیواره پایینی، به دلیل وجود لایه‌ی گازی (چگالی کم) و در نزدیکی دیواره بالایی، به دلیل تغییر فاز متان، پروفیل سرعت دارای مقادیر بیشینه محلی است. در شکل ۱۶ توزیع تنش برشی متان روی دیواره کناری در سه دمای متفاوت دیواره پایینی نشان داده شده است. در نقاط متناظر با مقادیر بیشینه‌ی پروفیل سرعت، تنش برشی نیز دارای مقادیر بیشینه محلی است. همچنین در نزدیکی دیواره‌های بالایی و پایینی با کاهش گرادیان سرعت، تنش برشی نیز کاهش یافته است.

توزیع انرژی جنبشی آشفتگی ( $K$ ) و نرخ اتلاف انرژی جنبشی ( $w$ ) برای سه دمای متفاوت دیواره پایینی در شکل ۱۷ مقایسه شده است. انرژی جنبشی آشفتگی، در ناحیه‌ی گازی (نزدیک دیواره پایینی) و محدوده‌ی رژیم گذر بحرانی

گذر بحرانی درون کانال‌های خنک‌کاری دایروی و مستطیلی پرداخته شده است. به دلیل وابستگی خواص انتقالی و پارامترهای ترمودینامیکی سیال خنک‌کننده به دما و فشار، معادله‌ی حالت گاز واقعی و روابط خواص انتقال متناسب با شرایط سیال خنک‌کننده در رژیم گذر بحرانی ارائه شده‌اند. برای شبیه‌سازی جریان خنک‌کننده، معادله‌ی حالت و رابطه‌ی ظرفیت گرمایی کانز و واگنر، رابطه‌ی لزجت کویناز و ضریب هدایت حرارتی یانگلاو انتخاب شده است. برای ارزیابی دقت معادله‌ی حالت و روابط خواص انتقال انتخاب شده، نتایج پژوهش حاضر با نتایج عددی مرجع در مدل آشفتگی اسپالارت - آلمارس مقایسه شده است. استفاده از روابط کانز و واگنر و خواص انتقال کویناز به جای روابط یانگلاو، باعث دقت بهتر نتایج تحلیل حرارتی هیدروژن و متان شده است. برای انتخاب مدل آشفتگی جریان خنک‌کننده، نتایج حاصل از مدل‌های آشفتگی مختلف با یکدیگر مقایسه شد و براین اساس، مدل اسپالارت - آلمارس برای رسیدن به حل‌های تقریبی و مدل  $SSTk - (\omega)$  برای رسیدن به نتایج دقیق‌تر انتخاب شده‌اند. ارتفاع متناظر با مقدار بیشینه‌ی ظرفیت گرمایی یا ناحیه‌ی اطراف نقطه‌ی عطف نمودار چگالی، نشان‌دهنده‌ی ناحیه‌ی رژیم گذر بحرانی هستند. همچنین محدوده‌ی افت انتقال حرارت با ناحیه‌ی افزایشی  $\mu$  و  $k$  شناسایی می‌شود. برای شناسایی موقعیت رژیم گذر بحرانی و شروع افت انتقال حرارت، توزیع  $c_p$  و  $k$  دمای دیواره در دبی‌های جرمی مختلف هیدروژن بررسی شده است. با افزایش میزان دبی جرمی، رژیم گذر بحرانی و شروع افت انتقال حرارت، دیرتر اتفاق افتاده و محدوده‌ی آن‌ها کاهش یافته است. رفتار پارامترهای ترمودینامیکی، موقعیت رژیم گذر بحرانی و شروع افت انتقال حرارت متان در سه دمای متفاوت دیواره پایینی درون کانال مستطیلی بررسی شده است. با افزایش دمای دیواره‌ی پایینی، رژیم گذر بحرانی و افت انتقال حرارت در ارتفاع بالاتری اتفاق افتاده است. همچنین، ضخامت لایه‌ی گازی، میزان شار حرارتی و سرعت جریان متان بزرگ‌تر شده است.

## ۸. فهرست علائم

$A$ : مساحت مقطع عرضی کانال؛  
 $C_p$ : گرمای ویژه در فشار ثابت؛  
 $D$ : قطر داخلی؛  
 $G_i$ : ثابت؛  
 $H$ : آنتالپی کل؛  
 $k$ : ضریب هدایت حرارتی؛

$K$ : انرژی جنبشی آشفتگی؛  
 $L_1$ : طول گرم نشده؛  
 $L_2$ : طول گرم شده؛  
 $P$ : فشار؛  
 $R$ : ثابت جهانی گاز؛  
 $T$ : دما؛  
 $t$ : زمان؛  
 $u_i$ : مؤلفه‌ی سرعت؛  
 $x_i$ : بردار مختصات؛  
 $X_{data}$ : مقدار داده‌های تجربی؛  
 $X_{calc}$ : مقدار داده‌های عددی؛  
 $X, Y, Z$ : مختصات پایه، ارتفاع و طول کانال؛  
 $y^+$ : فاصله‌ی بدون بعد از دیواره.

## علائم یونانی

$\alpha$ : انرژی آزاد هلمهولتز؛  
 $\alpha^*$ : توزیع باقی‌مانده‌ی انرژی هلمهولتز؛  
 $\alpha^o$ : توزیع گاز ایده‌آل انرژی هلمهولتز؛  
 $\delta$ : چگالی کاهش‌یافته؛  
 $\rho$ : لزجت مولکولی؛  
 $\rho$ : چگالی؛  
 $\tau_{ij}$ : تانسور تنش؛  
 $T$ : عکس دمای کاهش‌یافته؛  
 $w$ : نرخ اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی.

## زیرنویس‌ها

$c$ : مقدار بحرانی؛  
 $f$ : جمله‌ی لزجت؛  
 $r$ : جمله‌ی باقی‌مانده؛  
 $w$ : دیوار؛  
 $o$ : جمله‌ی گاز رقیق.

## منابع (References)

1. Hurlbert, EA., Whitley, R., Klem, MD. and et al. "International space exploration coordination group assessment of technology gaps for LOX/Methane propulsion systems for the global exploration roadmap", AIAA Paper 2016-5280 (2016).

2. Trejo, A., Garcia, C. and Choudhuri, A. "Experimental investigation of transient forced convection of liquid methane in a channel at high heat flux conditions", *Experimental Heat Transfer*, **29**(1) pp. 97-112 (2016).
3. Hendricks, RC., Graham, RW. and Hsu, Y.Y. and et al. "Experimental heat transfer results for cryogenic hydrogen flowing in tubes at subcritical and supercritical pressures to 800 pounds per square inch absolute", *NASA*



- TN D-3095 (1966).
4. Spencer, R. and Rousar, D., Supercritical oxygen heat transfer, *NASA CR-135339* (1977).
5. Giovanetti, A, Spadaccini, LJ. and Szetela, E.J. "Deposite formation and heat-transfer characteristics of hydrocarbon rocket fuels", *Journal of Spacecraft and Rockets*, **22**(5) pp. 574-580 (1985)
6. Liang, K., Yang, B. and Zhang, Z. "Investigation of heat transfer and coking characteristics of hydrocarbon fuels", *Propulsion and Power*, **14** pp. 789-796 (1998).
7. Votta, R., Battista, F., Ferraiuolo, M. and et al. "Design of an experimental campaign on methane regenerative liquid rocket engine cooling system", *AIAA Paper* 2013, 4146 (2013).
8. Votta, R., Battista, F., Salvatore, V. and et al. "Experimental investigation of transcritical methane flow in rocket engine cooling channel", *Applied Thermal Engineering*, **101**, pp. 61-70 (2016).
9. Lee, H. and Howell, J. R. "Turbulent developing convective heat transfer in tube for fluid near the critical point", *International Journal of Heat Mass Transfer*, **41**(10), pp. 1205-1218 (1997).
10. Cheng, X., Kuang, B. and Yang, Y. "Numerical analysis of heat transfer in supercritical water cooled flow channels", *Nuclear Engineering and Design*, **237**(3), pp. 240-252 (2007)
11. Palko, D. and Anglart, H. "Theoretical and numerical study of heat transfer deterioration in high performance light water reactor", *Science and Technology of Nuclear Installations* (2008).
12. Schnurr, N., Sastry, V. and Shapiro, A. "A Numerical analysis of heat transfer to fluids near the thermodynamic critical point including the thermal entrance region", *Journal of Heat Transfer*, **98** pp. 609-615 (1976).
13. Pizzarelli, M., Nasuti, F. and Onofri, M. "Flow analysis of transcritical methane in rectangular cooling channels", *AIAA Paper* 2008, 4556 (2008).
14. Pizzarelli, M., Nasuti, F. and Onofri, M. "Investigation of transcritical methane flow and heat transfer in curved cooling channels", *AIAA Paper* 2009-5304 (2009).
15. Pizzarelli, M., Urbano, A. and Nasuti, F. "Numerical analysis of deterioration in heat transfer to near-critical rocket propellants", *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, **57**(5), pp. 297-314 (2010)
16. Pizzarelli, M. "A cfd-derived correlation for methane heat transfer deterioration. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications", **69**(3), pp. 242-264 (2016).
17. Kunz, O, Wagner, W. "The GERG-2008 wide-range equation of state for natural gases and other mixtures: an expansion of GERG-2004", *Journal of chemical & engineering data*, **57**(11), pp. 3032-3091 (2012).
18. Younglove, BA. and Ely, JF. "Thermophysical properties of fluids. II. methane, ethane, propane, isobutane and normal butane", *Journal of Physical and Chemical reference data*, **16**(4), pp. 577-798 (1987).
19. Quinones-Cisneros, SE. and Deiters, UK. "Generalization of the friction theory for viscosity modeling", *The Journal of Physical Chemistry B* **110**(25), pp. 12820-12834 (2006)
20. Pletcher, RH., Tannehill, JC. and Anderson. DA., *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*, CRC Press (2012).
21. Spalart, PR. and Allmaras, SR. "A one-equation turbulence model for aerodynamic flows", *AIAA Paper*, 1992 0439 (1992).
22. Wilcox, D.C. "Turbulence modeling for CFD. DCW Industries", **2**, pp. 103-217 (1998).
23. Menter, FR. "Zonal two equation k-w turbulence models for aerodynamic flow", *AIAA Journal*, **32**(8), pp. 1598-1605 (1994).
24. Menter, FR., Kuntz, M. and Langtry, R. "Ten years of industrial experience with the turbulence model", *Turbulence, Heat and Mass Transfer*, **4**(1), pp. 625-632 (2003).