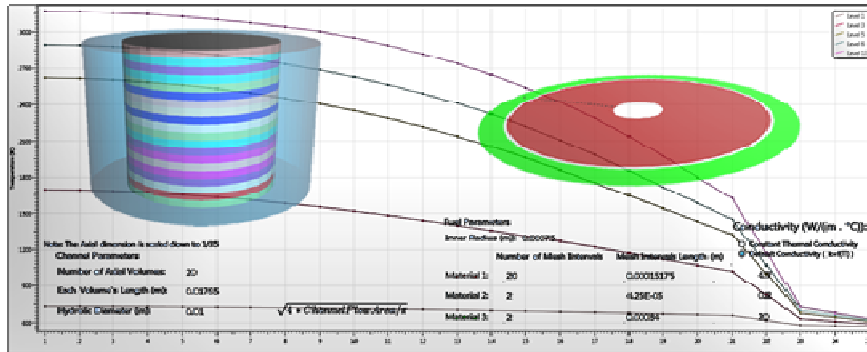


## کد محاسباتی ترموهیدرولیکی کانال بر مبنای تحلیل جریان دوفازی و مدل همگن



## گزارش فنی THECTA

بسته دوازدهم - ویرایش ۰ - اردیبهشت ۱۳۹۳

ANC-TEC-THL-SL-100

## فهرست مطالب

- ۱- چکیده..... ۷
- ۲- کلیدواژه..... ۹
- ۳- اختصارات..... ۹
- ۴- مقدمه..... ۱۰
- ۵- دامنه گزارش..... ۱۲
- ۶- معادلات و روابط..... ۱۳
- ۷- الگوریتم حل..... ۴۰
- ۸- اعتبارسنجی..... ۴۳

۹- مراجع..... ۷۳

## لیست شکل‌ها

- شکل ۱: فلوجارت حل برنامه ..... ۴۲
- شکل ۲: توزیع دمای سیال در طول کانال ..... ۴۶
- شکل ۳: توزیع چگالی سیال در طول کانال ..... ۴۸
- شکل ۴: توزیع سرعت سیال در طول کانال ..... ۵۰
- شکل ۵: توزیع فشار سیال در طول کانال ..... ۵۲
- شکل ۶: توزیع آنتالپی سیال در طول کانال ..... ۵۴
- شکل ۷: توزیع کیفیت سیال در طول کانال ..... ۵۵
- شکل ۸: تغییرات دمای سیال در طول کانال ..... ۶۰

- شکل ۹: تغییرات چگالی سیال در طول کانال ..... ۶۱
- شکل ۱۰: تغییرات سرعت سیال در طول کانال ..... ۶۲
- شکل ۱۱: تغییرات فشار سیال در طول کانال ..... ۶۳
- شکل ۱۲: تغییرات کسر حجمی بخار در طول کانال ..... ۶۴
- شکل ۱۳: تغییرات آنتالپی سیال در طول کانال ..... ۶۵
- شکل ۱۴: توزیع دمای شعاعی در مقطع پنجم ارتفاعی میله سوخت ..... ۶۶
- شکل ۱۵: توزیع دمای شعاعی در مقطع پنجم ارتفاعی میله سوخت ..... ۶۷
- شکل ۱۶: توزیع دمای شعاعی در مقطع دهم ارتفاعی میله سوخت ..... ۶۹
- شکل ۱۷: توزیع دمای شعاعی در مقطع پانزدهم ارتفاعی میله سوخت ..... ۷۱

## لیست جدول‌ها

- جدول شماره ۱: درصد خطای دمای محاسبه شده نسبت به کد RELAP5 (کلوین) ..... ۴۷
- جدول شماره ۲: درصد خطای چگالی محاسبه شده نسبت به کد RELAP5 (کیلوگرم بر مترمکعب)..... ۴۹
- جدول شماره ۳: درصد خطای سرعت محاسبه شده نسبت به کد RELAP5 (متر بر ثانیه)..... ۵۱
- جدول شماره ۴: درصد خطای فشار محاسبه شده نسبت به کد RELAP5 (مگاپاسکال) ..... ۵۳
- جدول شماره ۵: درصد خطای دمای محاسبه شده در مقطع پنجم نسبت به کد RELAP5..... ۶۸
- جدول شماره ۶: درصد خطای دمای محاسبه شده در مقطع دهم نسبت به کد RELAP5..... ۷۰
- جدول شماره ۷: درصد خطای دمای محاسبه شده در مقطع پانزدهم نسبت به کد RELAP5 ..... ۷۲

## ۱- چکیده

این کد محاسباتی ترموهیدرولیکی، یک کانال با جریان دوفاز همگن را که دارای یک سازه حرارتی است مدل‌سازی می‌کند. با این مدل می‌توان محاسبات ترموهیدرولیکی یک کانال با سیال فرضی اطراف یک میله سوخت در قلب راکتور را در حالت پایا انجام داد. کانال ارائه شده یکی از اجزای اساسی یک مدار ترموهیدرولیکی است که در بسته‌های نرم افزاری بعدی ارائه خواهد شد. مدل کانال دارای دو بخش حرارتی و هیدرودینامیکی است. در بخش حرارتی، معادله انتقال حرارت رسانش در سازه‌ی حرارتی شامل میله‌های سوخت یا دیواره‌های انتقال حرارت کانال برای هندسه‌های استوانه و تیغه به دو روش اختلاف محدود و المان محدود حل می‌شود. در کد ارائه شده امکان انتخاب سازه‌های حرارتی متشکل از مواد گوناگون مانند میله سوخت (شامل: قرص سوخت، فاصله گازی و غلاف سوخت) با در نظر گرفتن ضریب رسانش حرارتی متغیر با دما برای مواد مختلف وجود دارد.

در بخش دوم برنامه، محاسبات پارامترهای ترمودینامیکی و هیدرودینامیکی سیال در داخل کانال به همراه تولید حرارت با استفاده از معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی در حالت پایا برای جریان دوفاز همگن انجام شده است. برای دستیابی به پارامترهای ترمودینامیکی و هیدرودینامیکی جریان در فاز اشباع با فرض برابری سرعت فاز مایع و فاز بخار از مدل جریان همگن استفاده شده است. این مدل برای کسر حجمی بخار کوچک قابل قبول بوده و برای راکتورهای آب سبک بدلیل ایجاد کسر حجمی بخار ناچیز در خروجی کانال داغ مناسب است. خروجی این بخش بدست آوردن توزیع سرعت، دما، چگالی، فشار، کیفیت و آنتالپی سیال در طول کانال است.



## ۲- کلیدواژه

برنامه ترموهیدرولیکی کانال، جریان دوفاز همگن، حالت پایا، سازه‌های حرارتی استوانه‌ای و تیغه‌ای، روش حل اختلاف محدود و المان محدود.

## ۳- اختصارات

عبارت	عبارت اختصاری	توضیح
Thermohydraulic Channel Two Phase Analysis	THECTA	کد محاسباتی تحلیل پارامترهای ترموهیدرولیکی در کانال با استفاده از جریان دو فاز همگن

## ۴- مقدمه

در این برنامه محاسباتی، پارامترهای ترموهیدرولیکی در کانال گرم شونده با استفاده از مدل جریان دوفاز همگن در حالت پایا محاسبه می‌شوند. در بخشی از کانال داغ مجتمع‌های سوخت راکتورهای آب تحت فشار و کانال‌های راکتورهای آب جوشان، جریان سیال دارای شرایط دوفاز مایع و بخار است و بررسی جریان سیال دوفاز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. جریان سیال دوفاز دارای مدل‌های متنوعی است. دوفاز شدن سیال عبوری از یک کانال با دیواره‌ی گرم شونده قبل از رسیدن دمای سیال به دمای اشباع شروع می‌شود. با گذر سیال از میان کانال و برداشت حرارت از دیواره کانال رژیم‌های متفاوت دوفاز ایجاد می‌شود. برای شبیه سازی هر یک از این رژیم‌ها روابط نیمه تجربی مختلفی ارائه شده است که هر یک از این روابط در محدوده‌های خاصی از پارامترهای ترموهیدرولیکی معتبر می‌باشند. در این کد از مدل جریان همگن در حل معادلات بقا استفاده شده است. در این مدل فرض می‌شود سرعت فاز مایع و فاز بخار یکسان است

و توده سیال با خواص همگن شده بین دو فاز مایع و بخار در نظر گرفته می‌شود. این فرض در مقادیر کسر حجمی بخار کم معتبر است. در مدل همگن جریان دو فاز به عنوان یک جریان تک فاز با خواص میانگین سیال در نظر گرفته می‌شود. این مدل در صنایع مختلفی مانند تولید بخار، پالایشگاه و تبرید برای زمان قابل توجهی استفاده شده است [۱].

فرضیات اساسی مدل جریان همگن شامل سرعت برابر مایع و بخار، برقراری تعادل ترمودینامیکی بین دو فاز و استفاده از ضریب افت فشار تکفاز برای بدست آوردن ضریب افت فشار جریان دوفاز است. با توجه به استفاده از مدل جریان همگن پارامترهای ترموهیدرولیکی باید در محدوده مجاز در این مدل باشد. این محدودیت مربوط به کسر حجمی بخار است که باید کمتر از ۰/۵ باشد. بنابراین این مدل تنها در رژیم جریان حبابی شامل جوشش حبابی سرد و جوشش حبابی اشباع قابل استفاده است. در صورت رسیدن شرایط سیال به رژیم اسلاگ، برنامه با نمایش پیغام متوقف می‌شود.

در بخش تولید گرما، معادله رسانش حرارتی برای بدست آوردن توزیع دما در سازه‌های حرارتی با لحاظ ضریب رسانش حرارتی وابسته به دما، برای سازه‌های حرارتی مرکب با هندسه‌های تیغه و استوانه در حالت پایا حل می‌شود. تعیین شرایط مرزی بین سیال و سازه حرارتی با استفاده از روابط ضریب جابجایی حرارتی و شار حرارتی بحرانی انجام می‌شود.

## ۵- دامنه گزارش

کد محاسباتی ارائه شده شامل برنامه محاسبه پارامترهای ترموهیدرولیکی در کانال با استفاده از جریان دوفاز همگن، با امکان مدل‌سازی سازه‌های حرارتی استوانه‌ای و تیغه‌ای یک بعدی می‌باشد که قابلیت مدل‌سازی یک کانال گرم شونده مانند کانال حاوی یک میله سوخت در قلب راکتور را دارد.

## ۶- معادلات و روابط

معادلات به کار رفته در برنامه شامل معادلات هیدرولیکی در کانال و معادله رسانش حرارت در بخش تولید حرارت می‌باشد. روابط محاسبه ضریب اصطکاک تکفاز و دوفاز، کیفیت غیر تعادلی و کسر حجمی بخار نیز روابط کمکی هستند که برای تعیین شرایط هیدرولیکی و ترمودینامیکی سیال بکار می‌روند.

### ۶-۱- معادلات هیدرولیکی

معادلات اساسی بکار رفته در بخش هیدرولیکی شامل سه معادله بقای جرم، انرژی و مومنوم هستند.

۶-۱-۱- معادله بقای جرم

معادله‌ی بقای جرم بکار رفته در مدل بصورت زیر است [۴]:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial G_m}{\partial z} = 0 \quad (۱-۶)$$

در این رابطه،  $\rho_m$ ، چگالی مخلوط مایع و بخار و  $G_m$ ، سرعت جرمی سیال مخلوط مایع و بخار است. از آنجا که حل حالت پایا مورد نیاز است، بخش تغییرات زمانی چگالی در معادله‌ی فوق حذف می‌شود. ترم دوم معادله‌ی فوق نشان دهنده‌ی تغییرات سرعت جرمی در طول حجم کنترل است. چگالی و سرعت ورودی سیال به حجم کنترل معلوم، و چگالی و سرعت سیال در خروجی مجهول است. از این معادله برای تعیین سرعت در خروجی هر حجم کنترل استفاده می‌شود.

۶-۱-۲- معادله بقای مومنتوم

معادله‌ی بقای مومنتوم استفاده شده بصورت زیر است [۴]:

$$\frac{\partial G_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{G_m^2}{\rho_m} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{f_{TP} G_m^2}{2D_e \rho_m} - \rho_m g \quad (۶-۲)$$

در معادله‌ی فوق،  $\rho_m$ ، چگالی مخلوط مایع و بخار،  $G_m$ ، سرعت جرمی سیال مخلوط مایع و بخار،  $g$ ، شتاب جاذبه،  $f_{TP}$ ، ضریب اصطکاک دوفاز،  $D_e$ ، قطر هیدرولیکی کانال و  $p$ ، فشار سیال است. ترم‌های معادله فوق عبارتند از:

۱. جمله‌ی اول سمت چپ ناشی از تغییرات زمانی سرعت جرمی است. در حالت پایا این ترم حذف می‌شود.

۲. جمله‌ی دوم سمت چپ نماینده تغییرات مکانی مومنتوم در ورودی و خروجی حجم کنترل است.

۳. جمله‌ی اول سمت راست نشان دهنده‌ی مومنتوم اعمالی به حجم کنترل در اثر تغییر فشار در طول حجم کنترل است.

۴. جمله‌ی دوم سمت راست نشان دهنده‌ی تغییر مومنتوم اعمالی به حجم کنترل ناشی از افت اصطکاکی است.

۵. جمله‌ی سوم سمت راست نشان دهنده‌ی مومنتوم اعمالی ناشی از نیروی جاذبه است.

با استفاده از این معادله فشار در خروجی حجم کنترل محاسبه می‌شود.

۶-۱-۳- معادله‌ی بقای انرژی

معادله‌ی بقای انرژی در کانال بصورت زیر است [۴]:



$$\rho_m \frac{\partial h_m}{\partial t} + G_m \frac{\partial h_m}{\partial z} = \frac{q'' P_h}{A_z} + \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{G_m}{\rho_m} \left[ \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{f_{TP} G_m^2}{2D_e \rho_m} \right] \quad (3-6)$$

در این معادله  $\rho_m$ ، چگالی مخلوط مایع و بخار،  $G_m$ ، سرعت جرمی سیال مخلوط مایع و بخار،  $f_{TP}$ ، ضریب اصطکاک دوفاز،  $D_e$ ، قطر هیدرولیکی کانال،  $p$ ، فشار سیال،  $h_m$ ، آنتالپی مخلوط،  $q''$ ، شار حرارتی،  $A_z$ ، سطح مقطع کانال و  $P_h$ ، محیط کانال است.

۱. جمله‌ی اول سمت چپ نشان دهنده‌ی تغییرات زمانی آنتالپی در حجم کنترل است و در حل حالت پایا برابر صفر است.
۲. جمله‌ی دوم سمت چپ نشان دهنده تغییر مکانی آنتالپی ناشی از ورود و خروج جرم به حجم کنترل است.
۳. جمله‌ی اول سمت راست نشان دهنده حرارت تولید شده در داخلی حجم کنترل است.

۴. جمله‌ی دوم سمت راست نشان دهنده تغییر انرژی ناشی از تغییر فشار اعمال شده به حجم کنترل در زمان است. این جمله نیز در حل حالت پایا مورد نیاز نیست.
۵. جمله‌ی سوم سمت راست نشان دهنده تغییرات انرژی اعمالی به حجم کنترل ناشی از تغییر مکانی فشار است.
۶. جمله‌ی چهارم سمت راست نشان دهنده‌ی افت انرژی اعمالی به حجم کنترل ناشی از افت اصطکاک است.
- با استفاده از این معادله آنتالپی خروجی از حجم کنترل محاسبه می‌شود.

## ۶-۲- روابط کمکی بخش هیدرودینامیکی

## ۶-۲-۱- روابط ضریب اصطکاک

ضریب اصطکاک جریان با دیواره کانال با توجه به نوع جریان (تکفاز یا دوفاز) و با توجه به زبری سطح و عدد رینولدز بدست می‌آید. در صورتی که جریان سیال تکفاز باشد، با داشتن نسبت زبری به قطر هیدرولیکی و عدد رینولدز از نمودار مودی ضریب اصطکاک قابل دستیابی است. برای محاسبه‌ی ضریب اصطکاک جریان دوفاز از رابطه مارتینلی استفاده شده است. [۷].

$$f_{TP} = f_0 \times \left[ 1 + x \frac{v_{fg}}{v_f} \right] \times \left[ 1 + x \left( \frac{\mu_{fg}}{\mu_g} \right) \right]^{-1/4} \quad (۶-۴)$$

در روابط فوق،  $x$ ، کیفیت،  $\mu_f$ ، لزجت مایع اشباع،  $\mu_{fg}$ ، تفاضل لزجت مایع و بخار اشباع،  $v_f$ ، حجم مخصوص مایع اشباع،  $v_{fg}$ ، تفاضل حجم مخصوص مایع و بخار اشباع،  $f_0$ ، ضریب اصطکاک تک فاز و  $f_{TP}$ ، ضریب اصطکاک دوفاز است. این رابطه نسبت به سایر روابط محاسبه ضریب اصطکاک نتایج مناسب تری ارائه می دهد. روابط دیگری برای محاسبه ضریب اصطکاک دوفاز وجود دارد. در این روابط لزجت متوسط با توجه به لزجت مایع و بخار محاسبه می شود. یکی از این روابط رابطه McAdams است که در سال ۱۹۴۲ ارائه شده است: [۱]

$$\frac{1}{\mu} = \frac{x}{\mu_g} + \frac{(1-x)}{\mu_f} \quad (۵-۶)$$

رابطه دیگر رابطه Cicchitti ارائه شده در سال ۱۹۶۰ است: [۱]

$$\bar{\mu} = x\mu_g + (1-x)\mu_f \quad (6-6)$$

رابطه دیگر توسط Dukler در سال ۱۹۶۴ ارائه شده است: [۱]

$$\bar{\mu} = \rho [xv_g\mu_g + (1-x)v_f\mu_f] \quad (7-6)$$

پارامترهای فوق در شرح پارامترهای رابطه (۶-۴) ارائه شده است. پس از بدست آمدن لزجت متوسط، ضریب اصطکاک دوفاز با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$f_{TP} = 0.079 \left[ \frac{GD}{\bar{\mu}} \right]^{-1/4} \quad (8-6)$$

در رابطه فوق، G، سرعت جرمی، D، قطر لوله، و  $\bar{\mu}$ ، لزجت متوسط دوفاز است.

## ۶-۲-۲- روابط کیفیت و کسر حجمی بخار

در جریان مادون اشباع، جایی که هنوز دمای توده سیال کمتر از دمای اشباع است، امکان تولید حباب و وقوع جوشش در کنار دیواره کانال یا اطراف میله سوخت وجود دارد. بنابراین برای محاسبه کیفیت که بیانگر نسبت جرمی بخار به مجموع بخار و مایع است نیاز به روابط نیمه تجربی می‌باشد و نمی‌توان از رابطه کیفیت تعادلی که با استفاده از آنتالپی بدست می‌آید، برای پیش بینی کسر حجمی بخار استفاده کرد.

در برنامه ارائه شده از رابطه Levy برای پیش‌بینی کیفیت در جریان مادون سرد و همچنین جریان اشباع استفاده شده است. این روابط در ادامه ارائه شده است: [۲]

$$\begin{cases} x = x_e - x_d \exp\left(\frac{x_e}{x_d} - 1\right), x_e \geq x_d \\ x = 0, x_e < x_d \end{cases} \quad (۹-۶)$$

$$x_d = -\frac{C_{pf} \Delta T_d}{h_{fg}} \quad (۱۰-۶)$$

$$Y_B^+ = \frac{0.015}{\mu_f} \left[ \frac{\sigma D_h}{\nu_f} \right]^{1/2} \quad (۱۱-۶)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta T_d = \frac{q'}{P_h H_f} - Q \Pr Y_B^+, 0 \leq Y_B^+ \leq 5 \\ \Delta T_d = \frac{q'}{P_h H_f} - 5Q \left[ \Pr + \ln \left[ 1 + \Pr \left( \frac{Y_B^+}{5} - 1 \right) \right] \right], 5 < Y_B^+ < 30 \\ \Delta T_d = \frac{q'}{P_h H_f} - 5Q \left[ \Pr + \ln(1 + \Pr) + 0.5 \ln \left( \frac{Y_B^+}{30} \right) \right], 30 \leq Y_B^+ \end{array} \right. \quad (12-6)$$

$$Q = \frac{q'}{P_h C_{p_f} (\rho_f \tau_w)^{1/2}} \quad (13-6)$$

$$\tau_w = 0.125 f v_f G^2 \quad (14-6)$$



$$H_f = 0.023 \text{Re}_f^{0.8} \text{Pr}_f^{0.4} \frac{k_f}{D_h} \quad (15-6)$$

$$\alpha = \frac{xv_g}{(1-x)v_f S + xv_g} \quad (16-6)$$

در روابط فوق،  $x$ ، کیفیت غیر تعادلی،  $x_e$ ، کیفیت تعادلی،  $C_{pf}$ ، ظرفیت گرمایی مایع اشباع،  $h_{fg}$ ، آنتالپی اشباع،  $D_h$ ، قطر هیدرولیکی،  $\sigma$ ، کشش سطحی سیال،  $\mu_f$ ، لزجت مایع اشباع،  $v$ ، حجم مخصوص،  $q'$ ، توان خطی (وات بر متر)،  $H_f$ ، ضریب جابجایی حرارتی سیال در مجاورت دیواره،  $P_h$ ، محیط گرم شده،  $Pr$ ، عدد پرانتل،  $\tau_w$ ، تنش برشی روی دیواره،  $f$ ، ضریب اصطکاک،  $Re$ ، عدد رینولدز،  $S$ ، ضریب لغزش یا نسبت سرعت بخار به سرعت مایع و کسر حجمی بخار است. زیر نویس  $f$  مربوط به فاز مایع و  $g$  مربوط به بخار اشباع است.

برای محاسبه کسر حجمی بخار از رابطه ۶-۱۶ استفاده شده است. در جریان همگن این مقدار برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه S رابطه Smith ارائه شده است.

$$S = 0.4 + 0.6 \left[ \frac{0.4 + x \left( \frac{v_g}{v_f} - 0.4 \right)}{0.4 + 0.6x} \right]^{1/2} \quad (17-6)$$

هر دو حالت مدل جریان همگن ( $S=1$ ) و رابطه ۶-۱۷ در برنامه لحاظ شده است.

برای تعیین رژیم جریان باید کسر حجمی بخار بدست آمده را با مقادیر کسر حجمی بخار مرزی بین رژیم‌های مختلف مقایسه کرد. این مقادیر مرزی عبارتند از:

$\alpha_{BS}$ : کسر حجمی بخار مرزی بین رژیم جریان حبابی<sup>۱</sup> و اسلاگ<sup>۲</sup>

$\alpha_{SA}$ : کسر حجمی بخار مرزی بین رژیم جریان اسلاگ و حلقوی<sup>۳</sup>

$\alpha_{AM}$ : کسر حجمی بخار مرزی بین رژیم جریان حلقوی و قطرات آب معلق<sup>۴</sup> (پیش از شار حرارتی بحرانی)

روابط ارائه شده برای مقادیر فوق در مرجع [۳] آمده است.

---

Bubbly - ۱

Slug - ۲

Annular - ۳

Mist-Annular - ۴



## ۶-۳- معادلات سازه حرارتی

معادله انتقال حرارت رسانش به فرم زیر است:

$$k\nabla^2 T + S = C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (۶-۱۸)$$

در سازه‌های حرارتی، شامل میله و تیغه سوخت، معادله انتقال حرارت با روش حل عددی اختلاف محدود و المان محدود حل می‌شود.

با توجه به مختصات انتخابی برای حل این معادله (استوانه‌ای و کارتیزین) فرم لاپلاسیان تعیین می‌شود. در این معادله،  $k$ ، ضریب رسانش حرارتی مواد سازه حرارتی است که بصورت تابعی از دما در نظر گرفته می‌شود.  $S$ ، چشمه حجمی حرارت،

T، دما و C، ظرفیت گرمایی حجمی است. از آنجا که معادلات در حالت پایا حل می‌شود، ترم سمت راست که تغییرات زمانی دما را لحاظ می‌کند، حذف می‌شود.

در برنامه ارائه شده امکان انتخاب سازه حرارتی با هندسه استوانه‌ای (میله سوخت) و هندسه کارتیزین (تیغه سوخت) و همچنین انتخاب روش حل اختلاف محدود و المان محدود وجود دارد. همچنین در مختصات استوانه‌ای امکان تعریف سوخت توپر و توخالی وجود دارد.

در برنامه، دو حالت برای تعیین ضریب رسانش حرارتی مواد وجود دارد. حالت اول حالت پیش فرض است که در آن ضریب رسانش سوخت (اکسید اورانیوم و سوخت آلومنیومی)، فاصله گازی (هلیوم) و غلاف (زیرکونیوم و آلومینیومی) به صورت تابعی از دما در برنامه تعریف می‌شود. در حالت دوم کاربر می‌تواند برای ضریب رسانش حرارتی مواد یک عدد ثابت تعیین کند.

ضریب رسانش حرارتی پیش فرض برای سوخت و غلاف سوخت اکسید اورانیوم از روابط MATPRO در نظر گرفته شده است [۲].

$$A = \frac{40.4}{(464 + T)}$$

$$w = A + 1.216 \times 10^{-4} \times e^{(1.867 \times 10^{-3} \times T)} \quad (19-6)$$

$$K = \frac{0.01605 \times w}{1.604972 \times 10^{-4}}$$

در این رابطه  $T$  دما بر حسب درجه سانتیگراد است و  $K$  ضریب رسانش حرارتی بر حسب وات بر متر بر کلون است.

ضریب رسانش حرارتی فاصله گازی معادل ضریب رسانش حرارتی گاز هلیوم لحاظ شده است.

$$K = 2.639 \times 10^{-3} \times T^{0.7085} \quad (۲۰-۶)$$

در رابطه فوق T دما بر حسب کلوین و K ضریب رسانش حرارتی بر حسب وات بر متر بر کلوین است. رابطه ضریب رسانش حرارتی غلاف سوخت زیرکونیومی به صورت زیر است.

$$w = \left[ (7.67 \times 10^{-9} \times T - 1.45 \times 10^{-5}) \times T + 0.0209 \right] \times T + 7.51$$

$$K = \frac{1.6056 \times 10^{-4} \times w}{1.604972 \times 10^{-4}} \quad (۲۱-۶)$$

در رابطه فوق T دما بر حسب کلوین و K ضریب رسانش حرارتی بر حسب وات بر متر بر کلوین است.

ضریب رسانش حرارتی سوخت آلیاژ آلومینیومی از روابط ارائه شده در گزارش فنی آژانس بین المللی انرژی اتمی استفاده شده است [۵].

$$K = 180.26 - 2.29 \times 10^{-2} \times T \quad (۲۲-۶)$$

در رابطه فوق  $T$  دما بر حسب کلوین و  $K$  ضریب رسانش حرارتی بر حسب وات بر متر بر کلوین است. ضریب رسانش حرارتی آلومینیوم به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$K = 130 \times e^{-\left(\frac{T-196.3}{343}\right)^2} + 213.1 \times e^{-\left(\frac{T-759.9}{599.7}\right)^2} \quad (۲۳-۶)$$

در رابطه فوق  $T$  دما بر حسب کلوین و  $K$  ضریب رسانش حرارتی بر حسب وات بر متر بر کلوین است.

#### ۴-۶- معادلات مرز مشترک

شرط مرز مشترک بخش هیدرودینامیکی و حرارتی توسط ضریب جابجایی حرارتی سیال در کنار دیواره و دمای حجم سیال تعیین می‌شود. برای بدست آوردن ضریب جابجایی حرارتی سیال از روابط تجربی ارائه شده برای جریان تک‌فاز و



دوفاز استفاده شده است. همچنین تعیین شار حرارتی بحرانی به پارامترهای سیال و سازه حرارتی وابسته است. در این بخش دو پارامتر ضریب جابجایی حرارتی سیال در کنار دیواره و شار حرارتی بحرانی شرح داده می‌شود.

۶-۴-۱- ضریب جابجایی حرارتی

برای محاسبه ضریب جابجایی حرارتی سیال آشفته‌ی تک‌فاز از معادله Dittus-Boelter (۶-۱۹) استفاده می‌شود. این معادله شامل دو ضریب است. یکی از دو ضریب مشابه عدد رینولدز است و بیانگر نسبت انتقال مومنتوم به نیروی لزجت است و ضریب دوم مشابه عدد پرانتل است که بیانگر نسبت پخش مومنتوم به پخش حرارتی است.

$$hturb1 = \left[ \frac{\rho V D}{\mu} \right]^{0.8}, hturb2 = \left[ \frac{C_p \mu}{k} \right]^{1/3} \quad (۲۴-۶)$$

$$h_{conv_{sub}} = \frac{0.023K}{D} \times hturb1 \times hturb2$$

برای محاسبه‌ی ضریب جابجایی حرارتی سیال دوفاز از دو روش استفاده شده است. در روش Chen ضریب جابجایی حرارتی در جوشش هسته‌ای مادون سرد محاسبه می‌شود. در این روش ضریب جابجایی حرارت به دو بخش تقسیم می‌شود: انتقال حرارت جابجایی ناشی از جوشش و انتقال حرارت جابجایی ناشی از جریان سیال. بخش‌های این رابطه عبارتند از:

$$h_{convTP} = h_c + h_{NOB}$$

$$h_c = \frac{0.023k}{D} F_1 F_2 F$$

$$F_1 = \left[ \frac{\rho V (1-x) D}{\mu} \right]^{0.8}, F_2 = \left[ \frac{C_p \mu}{k} \right]^{0.4}, F = \left[ \frac{Pr+1}{2} \times \Phi_{f_0}^2 \right]^{0.444}$$

$$\Phi_{f_0} = \left[ 1 + x \frac{v_{fg}}{v_g} \right] \times \left[ 1 + x \frac{\mu_{fg}}{\mu_g} \right]^{-0.25}$$

$$h_{NOB} = 0.00122 \times F_3 \times \Delta T_{sat}^{0.24} \times \Delta P_{sat}^{0.75} \times S$$

$$F_3 = \left[ \frac{k^{0.79} C_p^{0.45} \rho^{0.49} g^{0.25}}{\sigma^{0.5} \mu^{0.29} h_{fg}^{0.24} \rho_g^{0.24}} \right]$$

(۲۵-۶)

پارامتر  $\Delta T_w$ ، اختلاف دمای دیواره و دمای اشباع سیال و  $\Delta P_{sat}$ ، اختلاف فشار اشباع در دمای دیواره و فشار سیال است.

سایر پارامترهای روابط فوق مشابه روابط قبل است و نیازی به تعریف مجدد آنها نمی‌باشد. رابطه Chen برای جریان



دوفاز با جوشش هسته‌ای مادون سرد و اشباع استفاده می‌شود. این رابطه را بصورت دیگر می‌توان نوشت. در این رابطه ضریب جابجایی حرارتی جوشش هسته‌ای اشباع و مادون سرد بصورت حاصل جمع دو بخش جابجایی حرارتی ماکروسکوپیک و میکروسکوپیک نوشته می‌شود:

$$h_{conv,TP} = h_{mac} \times F + h_{mic} \times S \quad (26-6)$$

در این رابطه  $h_{mic}$  همان رابطه Dittus-Boelter برای خواص سیال در حالت مایع و  $h_{mac}$  همان پارامتر  $h_{NOB}$  بدون ضریب  $S$  است.  $S$ ، پارامتر تصحیح که از نمودار مرجع [۱] و یا رابطه (۲۷-۶) بدست می‌آید. همچنین ضریب  $F$  در رابطه (۲۶-۶) از رابطه (۲۷-۶) بدست می‌آید.

$$S = \begin{cases} (1 + 0.12 \text{Re}_{TP})^{-1.14}, & \text{Re}_{TP} < 32.5 \\ (1 + 0.42 \text{Re}_{TP}^{0.78})^{-1}, & 32.5 \leq \text{Re}_{TP} < 70, \\ 0.0797, & \text{Re}_{TP} \geq 70 \end{cases} \quad (27-6)$$

$$\text{Re}_{TP} = \min(70, \text{Re}_f \times F^{1.25} \times 10^{-4})$$

$$F = 2.35 \times (x_{tt}^{-1} + 0.213)^{0.736}, x_{tt}^{-1} = \left( \frac{G_g}{G_f} \right)^{0.9} \left( \frac{\rho_f}{\rho_g} \right)^{0.5} \left( \frac{\mu_g}{\mu_f} \right)^{0.1}$$

مقدار پارامتر F در رابطه (27-6) برای جریان جوشش هسته‌ای اشباع بکار می‌رود. برای جوشش هسته‌ای مادون سرد این ضریب اصلاح می‌شود.

$$\begin{cases} F' = F - 0.2(T_{sat} - T_f) \times (F - 1) \rightarrow 0 < T_{sat} - T_f \leq 5 \\ F' = 1 \rightarrow 5 < T_{sat} - T_f \end{cases} \quad (28-6)$$

$T_{sat}$ ، دمای اشباع و  $T_f$ ، دمای سیال است.

برای هر یک از رژیم‌های جریان روابط ضریب جابجایی حرارتی خاصی وجود دارد. اما از آنجا که مدل جریان دوفاز همگن تنها برای جوشش هسته‌ای نتایج خوبی ارائه می‌کند، سایر روابط شامل جوشش انتقالی مادون سرد و اشباع و جوشش لایه‌ای مادون سرد و اشباع در این برنامه بکار نرفته است.

۶-۴-۲- شار حرارتی بحرانی

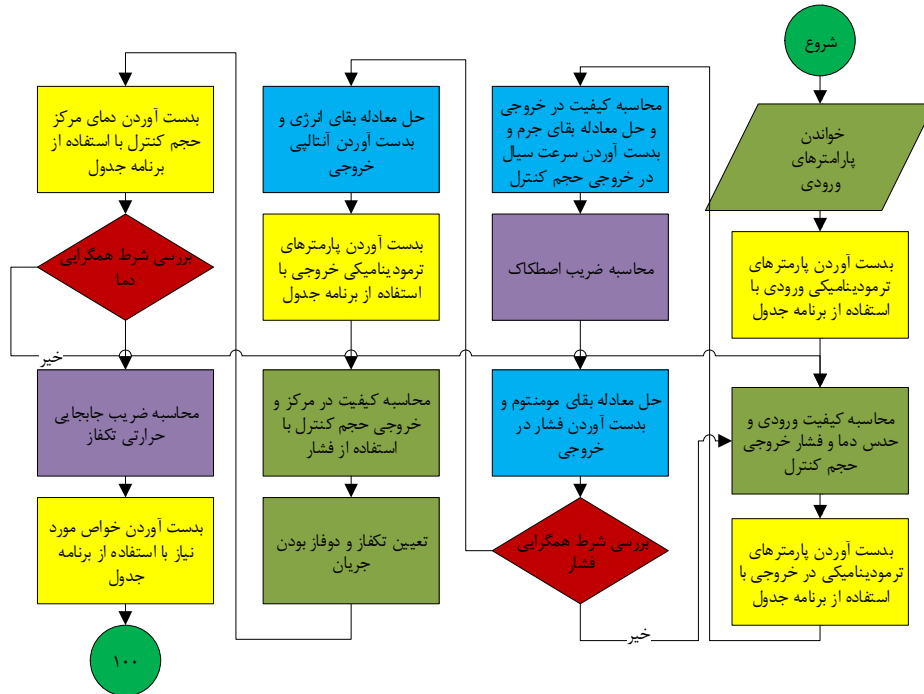
یکی از پارامترهایی که متأثر از شرایط سازه حرارتی و سیال است، شار حرارتی بحرانی می باشد. ایجاد شرایطی در مرز سیال و دیواره سازه حرارتی که باعث کاهش شدید ضریب انتقال حرارت جابجایی و به دنبال آن افزایش دمای سطح دیواره شود را شار حرارتی بحرانی می‌گویند. این شرایط می‌توان در هر یک از رژیم‌های جریان دوفاز حبابی، اسلاگ و یا

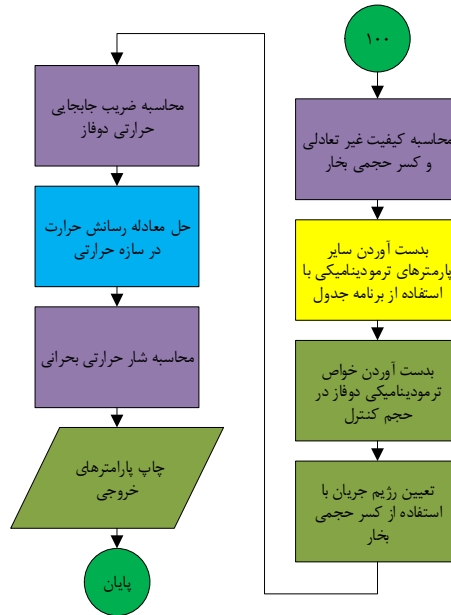
حلقوی رخ دهد. زمانی که بخشی از دیواره در معرض مستقیم مقدار قابل توجهی از بخار ناشی از جوشش قرار گیرد، بدلیل تفاوت چگالی و سایر خواص بخار و مایع، ضریب انتقال حرارت بخار به مقدار زیادی کمتر از مایع است و دمای سطح دیواره به شدت افزایش می‌یابد. تلاش‌های متعددی برای ارائه روابط پیش بینی شار حرارتی بحرانی انجام شده است. از این میان در برنامه کامپیوتری ارائه شده از جدول شار حرارتی بحرانی AECL-UO استفاده شده است. مقادیر شار حرارتی این جدول بر اساس سه پارامتر کیفیت تعادلی، فشار و شار گرمی یا سرعت گرمی تعیین می‌شوند. اطلاعات تفصیلی در مورد این جدول در مرجع [۳] ارائه شده است.

## ۷- الگوریتم حل

در این بخش الگوریتم به کار رفته برای حل معادلات و روابط بخش قبل ارائه می‌شود. در این برنامه، کانال به تعداد دلخواهی حجم کنترل تقسیم می‌شود و معادلات بقای سه گانه برای حجم کنترل حل شده و پس از محاسبه ضریب جابجایی حرارتی، معادله انتقال حرارت در سازه حرارتی بدست می‌آید و پس از همگرایی این روند برای حجم کنترل بعدی ادامه پیدا می‌کند. در شکل ۱ فلوچارت حل برنامه بصورت مختصر ارائه شده است. در داخل برخی از این بخش‌ها، حلقه‌های تکرار دیگری از جمله حدس دمای سطح دیواره و بررسی همگرایی آن و همچنین حدس‌های مورد نیاز معادله رسانش حرارتی، وجود دارد. لازم به ذکر است در این برنامه کلیه خواص مادون سرد و اشباع آب با استفاده از جدول خواص ترمودینامیکی IF97 به کار گرفته شده است.







شکل ۱: فلوچارت حل برنامه

## ۸- اعتبارسنجی

برای بررسی عملکرد برنامه نوشته شده، یک مسأله تک‌فاز و یک مسأله دوفاز مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

### ۸-۱- مسأله جریان تک‌فاز در کانال عمودی

برای بررسی نتایج کد در حالت تک‌فاز یک کانال در نظر گرفته شده است و توزیع پارامترهای ترموهیدرولیکی شامل دما، چگالی، فشار، سرعت، آنتالپی و کیفیت تعادلی در طول کانال بدست آمده است.

#### ۸-۱-۱- مشخصات ترموهیدرولیکی کانال

- فشار ورودی: ۱۵ مگاپاسکال

- دمای ورودی: ۵۶۳.۱۵ کلوین (۲۹۰ درجه سانتیگراد)
- دبی سیال: ۰.۳۷۴ کیلوگرم بر ثانیه
- توان تولیدی: ۸۹۰۰۰ وات
- توزیع توان محوری در کانال: کسینوسی متقارن

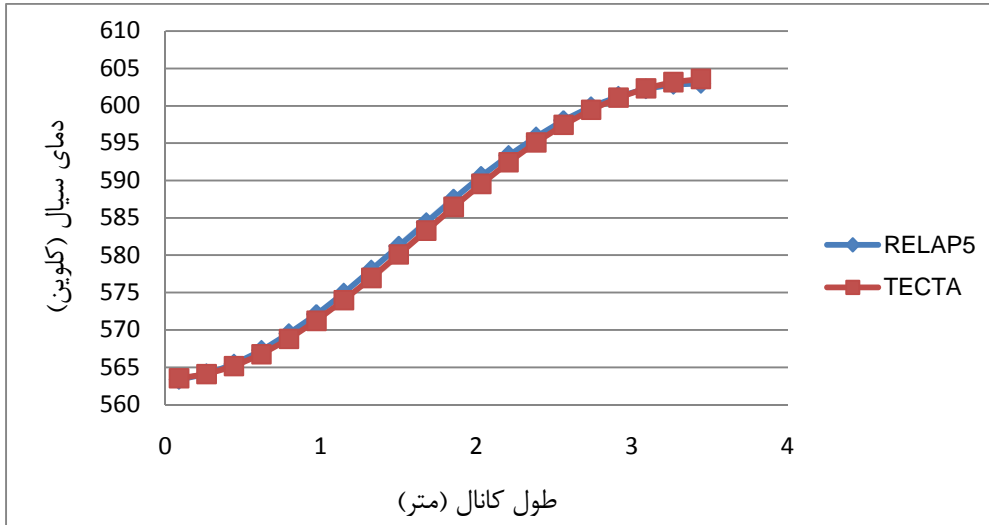
## ۸-۱-۲- مشخصات هندسی کانال

- قطر معادل کانال: ۰.۰۱۰۱۸۹۳ متر
- سطح مقطع کانال: ۰.۰۰۰۰۸۱۵ مترمربع
- طول کانال: ۳.۵۳ متر (تعداد حجم‌های محوری: ۱۰)
- زبری سطح:  $۴ \times ۱۰^{-۵}$  متر

۸-۱-۳- نتایج حاصل از اجرای برنامه

در شکل‌های زیر توزیع پارامترهای ترموهیدرولیکی در طول کانال ارائه شده است. برای مقایسه این پارامترها، مقادیر بدست آمده از کد RELAP5 نیز ارائه شده است. در جدول‌های مربوط به هر شکل درصد خطای برنامه نسبت به نتایج کد RELAP5 آمده است.

۸-۱-۳-۱- توزیع دمای سیال در طول کانال



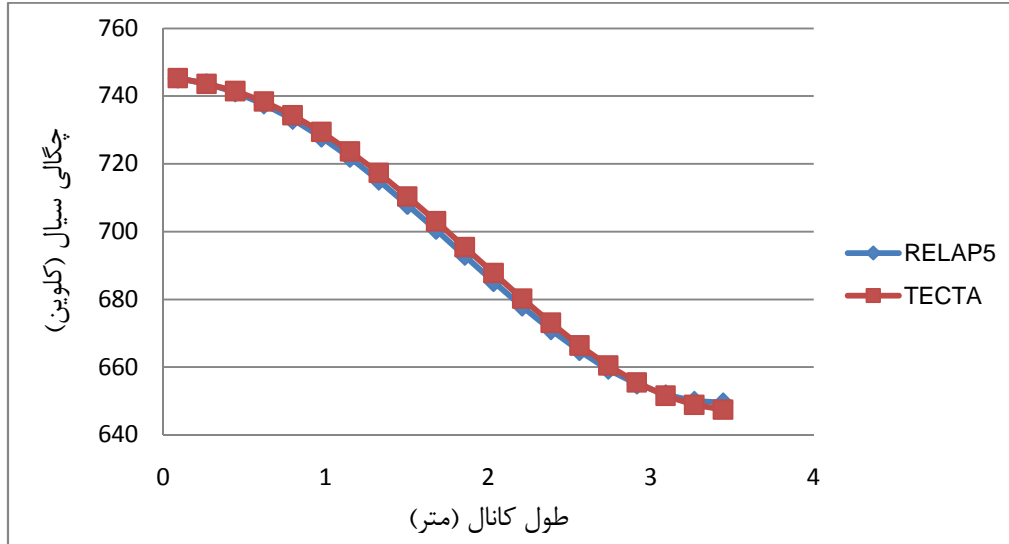
شکل ۲: توزیع دمای سیال در طول کانال

جدول شماره ۱: درصد خطای دمای محاسبه شده نسبت به کد RELAP5 (کلوین)

<b>Height (m)</b>	0.088	0.265	0.441	0.618	0.794	0.971	1.147	1.324	1.5	1.677
<b>RELAP5</b>	563.3	564.1	565.4	567.2	569.5	572.1	574.9	578.0	581.2	584.3
<b>THECTA</b>	563.5	564.1	565.1	566.7	568.8	571.2	573.9	576.9	580.1	583.3
<b>Error (%)</b>	0.032	0.009	0.049	0.089	0.128	0.150	0.168	0.186	0.194	0.1862

<b>Height (m)</b>	1.853	2.03	2.206	2.383	2.559	2.736	2.912	3.089	3.265	3.442
<b>RELAP5</b>	587.5	590.6	593.4	595.9	598.0	599.9	601.3	602.3	602.8	602.9
<b>THECTA</b>	586.4	589.5	592.4	595.1	597.4	599.5	601.1	602.3	603.2	603.6
<b>Error (%)</b>	0.182	0.175	0.154	0.130	0.099	0.070	0.029	0.011	0.055	0.103

۸-۱-۳-۲- توزیع چگالی سیال در طول کانال



شکل ۳: توزیع چگالی سیال در طول کانال

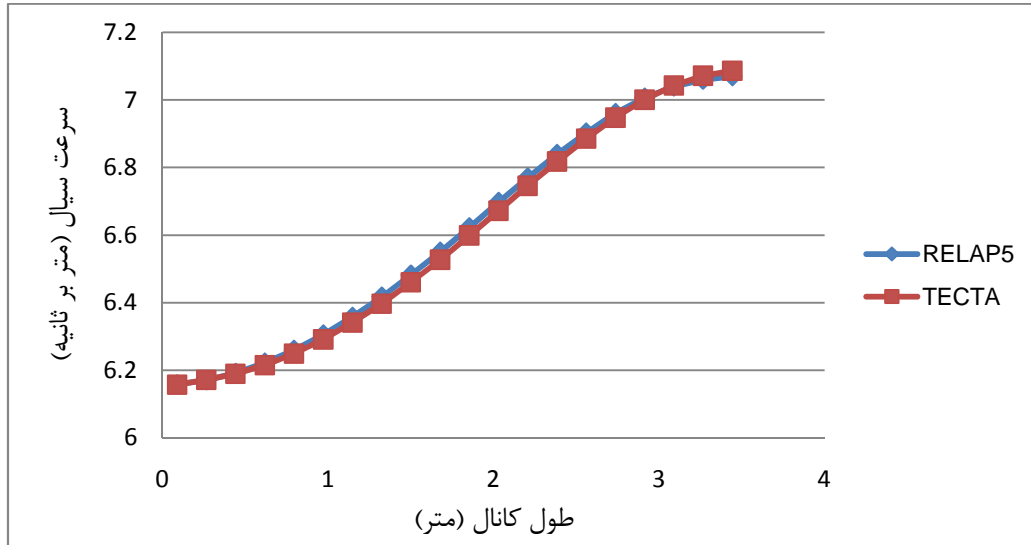


جدول شماره ۲: درصد خطای چگالی محاسبه شده نسبت به کد RELAP5 (کیلوگرم بر مترمکعب)

<b>Height (m)</b>	0.088	0.265	0.441	0.618	0.794	0.971	1.147	1.324	1.5	1.677
<b>RELAP5</b>	745.2	743.7	741.2	737.6	733.1	727.8	721.8	715.1	707.9	700.6
<b>THECTA</b>	745.3	743.6	741.5	738.4	734.3	729.4	723.7	717.3	710.4	703.1
<b>Error (%)</b>	0.008	0.016	0.043	0.107	0.170	0.219	0.258	0.309	0.341	0.352

<b>Height (m)</b>	1.853	2.03	2.206	2.383	2.559	2.736	2.912	3.089	3.265	3.442
<b>RELAP5</b>	692.9	685.2	677.9	671.0	664.8	659.3	655.0	651.9	650.0	649.6
<b>THECTA</b>	695.4	687.8	680.2	673.1	666.4	660.5	655.5	651.6	648.9	647.5
<b>Error (%)</b>	0.362	0.381	0.348	0.316	0.245	0.184	0.072	0.044	0.178	0.322

۸-۱-۳- توزیع سرعت سیال در طول کانال



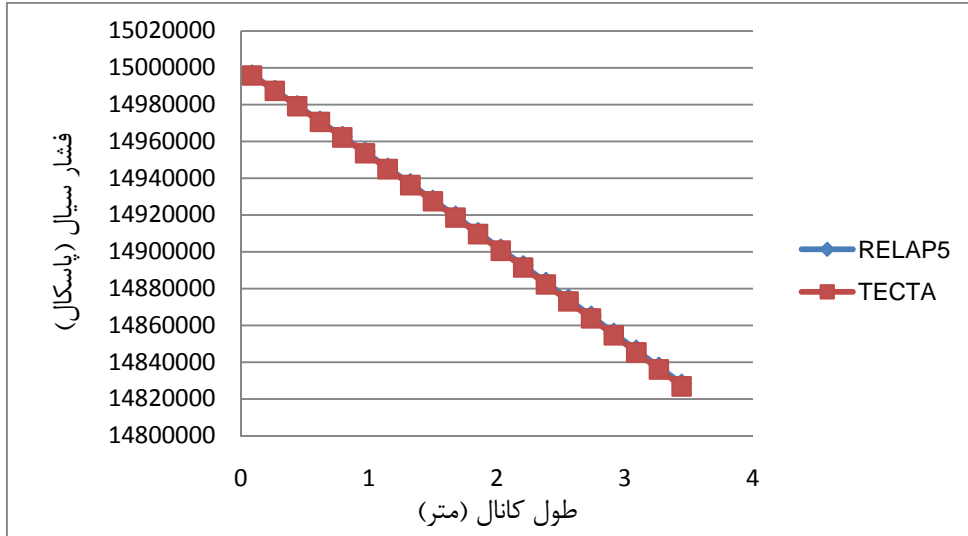
شکل ۴: توزیع سرعت سیال در طول کانال

جدول شماره ۳: درصد خطای سرعت محاسبه شده نسبت به کد RELAP5 (متربرثانیه)

<b>Height (m)</b>	0.088	0.265	0.441	0.618	0.794	0.971	1.147	1.324	1.5	1.677
<b>RELAP5</b>	6.158	6.170	6.191	6.221	6.260	6.305	6.357	6.417	6.482	6.550
<b>THECTA</b>	6.157	6.171	6.189	6.215	6.249	6.291	6.341	6.397	6.46	6.527
<b>Error (%)</b>	0.011	0.013	0.039	0.101	0.171	0.219	0.256	0.312	0.338	0.356

<b>Height (m)</b>	1.853	2.03	2.206	2.383	2.559	2.736	2.912	3.089	3.265	3.442
<b>RELAP5</b>	6.623	6.697	6.769	6.839	6.903	6.960	7.006	7.04	7.06	7.07
<b>THECTA</b>	6.599	6.672	6.746	6.818	6.886	6.948	7.001	7.043	7.072	7.087
<b>Error (%)</b>	0.356	0.378	0.346	0.311	0.249	0.179	0.076	0.043	0.170	0.240

۸-۱-۳-۴- توزیع فشار سیال در طول کانال



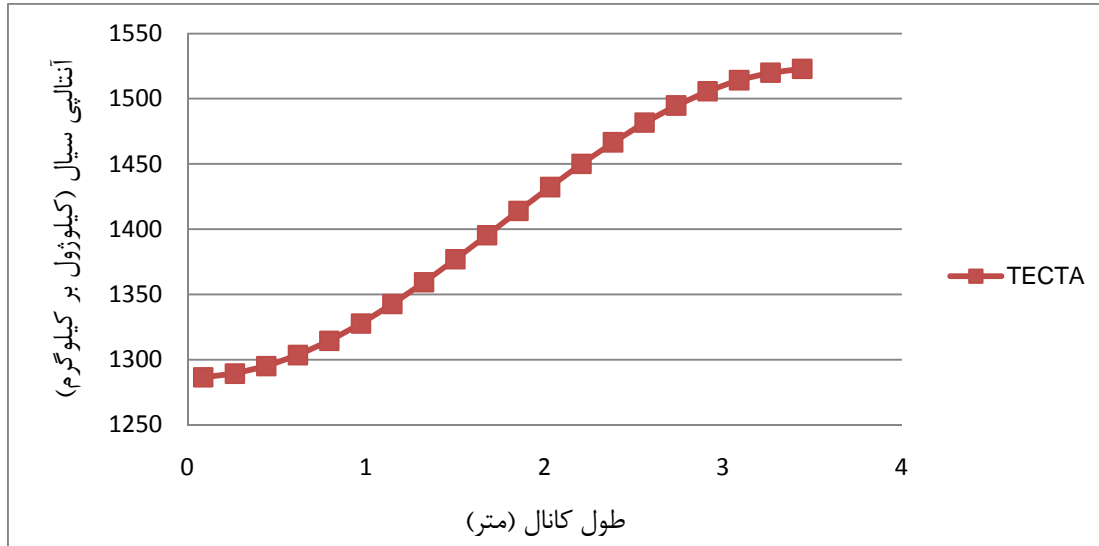
شکل ۵: توزیع فشار سیال در طول کانال

جدول شماره ۴: درصد خطای فشار محاسبه شده نسبت به کد RELAP5 (مگاپاسکال)

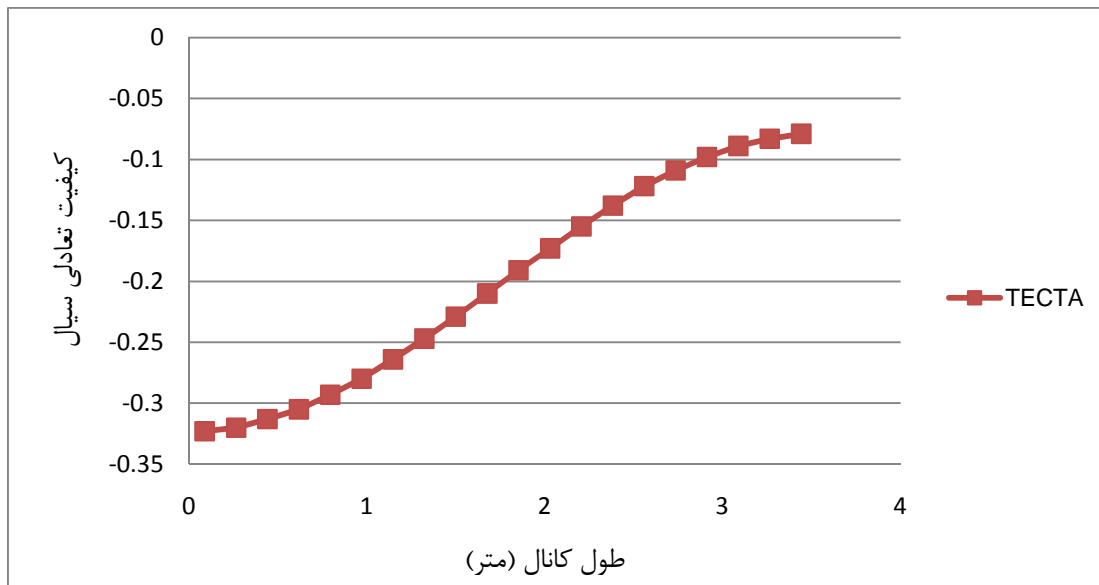
<b>Height (m)</b>	0.088	0.265	0.441	0.618	0.794	0.971	1.147	1.324	1.5	1.677
<b>RELAP5</b>	14.996	14.988	14.980	14.971	14.963	14.954	14.946	14.937	14.928	14.92
<b>THECTA</b>	14.996	14.987	14.979	14.971	14.962	14.954	14.945	14.936	14.927	14.91
<b>Error (%)</b>	0.004	0.004	0.004	0.005	0.005	0.005	0.005	0.006	0.006	0.007

<b>Height (m)</b>	1.853	2.03	2.206	2.383	2.559	2.736	2.912	3.089	3.265	3.442
<b>RELAP5</b>	14.911	14.902	14.893	14.884	14.874	14.865	14.856	14.847	14.838	14.828
<b>THECTA</b>	14.910	14.901	14.892	14.882	14.873	14.864	14.855	14.845	14.836	14.827
<b>Error (%)</b>	0.007	0.007	0.008	0.009	0.009	0.009	0.010	0.010	0.010	0.010

۸-۱-۳-۵- توزیع آنتالپی و کیفیت تعادلی سیال در طول کانال



شکل ۶: توزیع آنتالپی سیال در طول کانال



شکل ۷: توزیع کیفیت سیال در طول کانال

**۸-۲- مسأله جریان دوفاز در کانال عمودی**

در مسأله دوفاز یک کانال با شرایطی که در خروجی آن بخار وجود دارد مورد بررسی قرار گرفته است. برای مقایسه از نتایج کد RELAP5 برای این مسأله استفاده شده است. لازم به ذکر است نتایج بدست آمده برای مدل جریان همگن دوفاز است و کد RELAP5 از مدل جریان مجزای شش معادله‌ای استفاده می‌کند. بنابراین وجود اختلاف قابل توجهی در نتایج مورد انتظار است. مشخصات هندسی کانال مشابه مسأله تک‌فاز است.

**۸-۲-۱- مشخصات ترموهیدرولیکی مسأله دوفاز**

- فشار ورودی: ۱۳ مگاپاسکال
- دمای ورودی: ۵۶۳/۱۵ کلوین (۲۹۰ درجه سانتیگراد)



- دبی سیال: ۰.۳۷۴ کیلوگرم بر ثانیه
- توان تولیدی: ۱۱۰۰۰۰ وات
- توزیع توان محوری در کانال: کسینوسی متقارن

مشخصات بخش سازه حرارتی

- نوع سازه حرارتی: میله سوخت (استوانه توخالی)
- روش حل انتخاب شده: اختلاف محدود
- ابعاد هندسی (مشابه سوخت نیروگاه بوشهر)

- طول: ۳/۵۳ متر

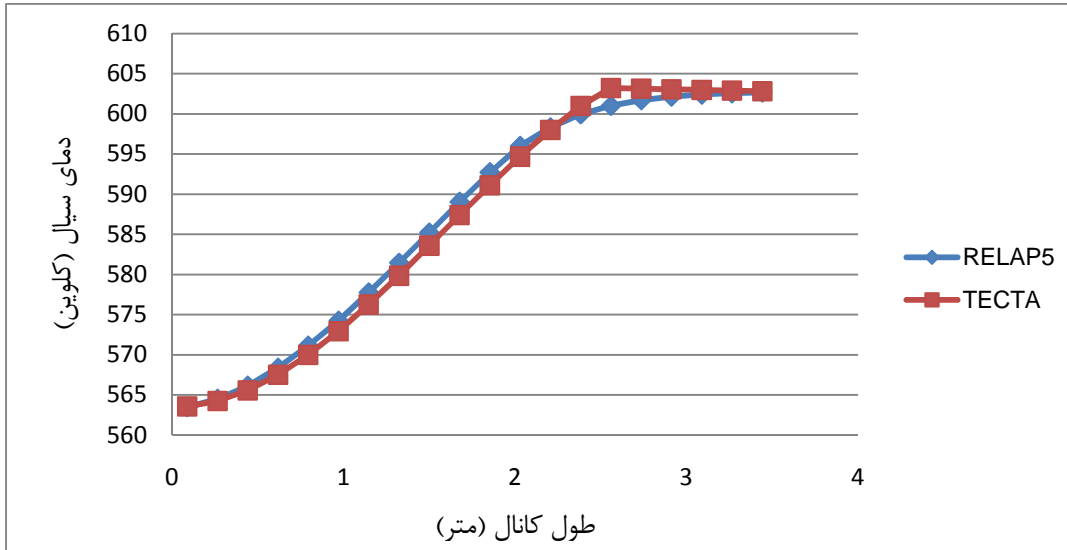
- تعداد گره محوری: ۲۰
- تعداد گره شعاعی: ۲۰ گره در سوخت، ۲ گره در فاصله گازی و ۲ گره در غلاف سوخت
- شعاع داخلی قرص سوخت: ۰/۷۵ میلیمتر
- شعاع خارجی قرص سوخت: ۳/۷۸۵ میلیمتر
- شعاع داخلی غلاف سوخت: ۳/۸۷ میلیمتر
- شعاع خارجی غلاف سوخت: ۴/۵۵ میلیمتر
- ضریب رسانش حرارتی
- سوخت: ۳؛ فاصله گازی: ۰.۲۸؛ غلاف: ۳۰ (وات بر متر بر کلوین)

## ۸-۲-۲- نتایج حاصل از اجرای برنامه

در شکل‌های زیر توزیع پارامترهای ترموهیدرولیکی در طول کانال ارائه شده است. برای مقایسه این پارامترها، مقادیر بدست آمده از کد RELAP5 نیز ارائه شده است. برای محاسبه کسر حجمی بخار، در شکل ۱۲، نتایج رابطه مدل جریان همگن با نسبت لغزش برابر ۱ ارائه شده است. با توجه به این شکل بر اساس پیش بینی برنامه نوشته شده در گره نهم در اطراف جداره حباب شکل می‌گیرد (جوشش سرد) و شروع جریان دوفاز اشباع در حجم پانزدهم رخ می‌دهد. در حالی که بر اساس پیش بینی کد RELAP5 شروع تولید حباب در حجم هفتم پیش بینی شده است. دلیل اختلاف موجود در شکل‌ها ناشی از تفاوت در مدل جریان دوفاز به کار رفته در برنامه و کد RELAP5 می‌باشد.

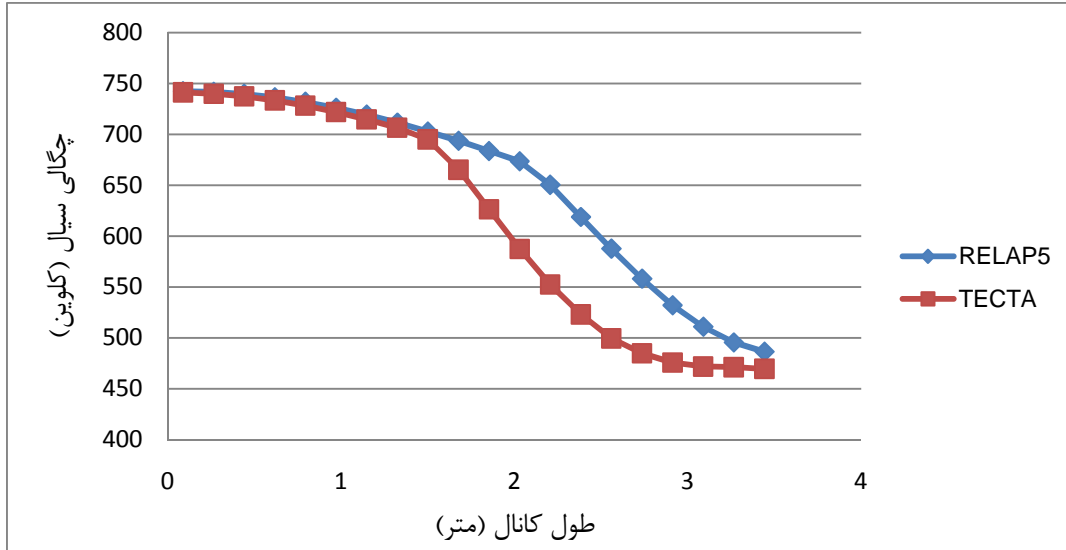
سازه حرارتی تعریف شده در کانال شامل یک میله سوخت با ابعاد هندسی سوخت نیروگاه بوشهر است. روش انتخابی برای حل معادله انتقال حرارت، روش اختلاف محدود است.

۸-۲-۲-۱- توزیع دمای سیال در طول کانال



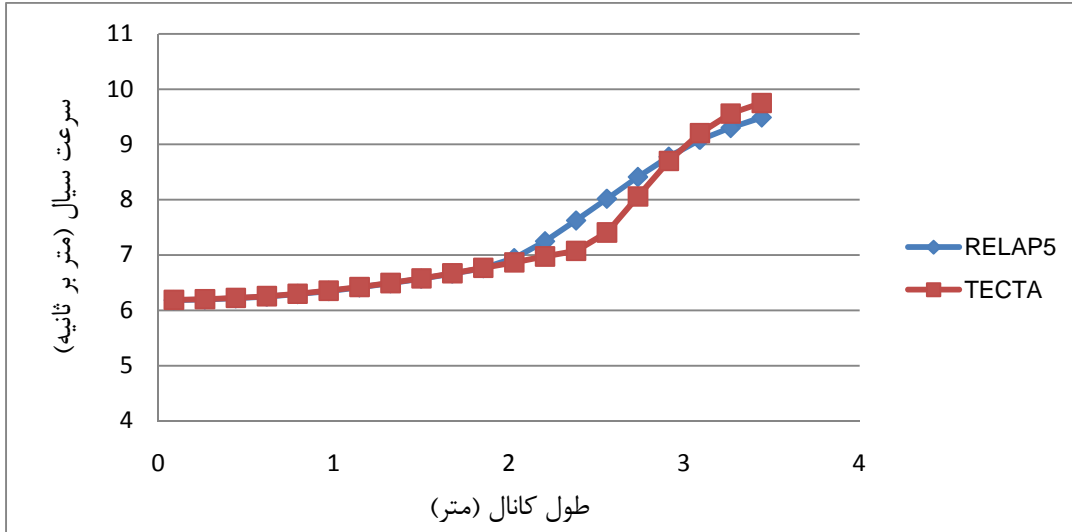
شکل ۸: تغییرات دمای سیال در طول کانال

۸-۲-۲- توزیع چگالی سیال در طول کانال



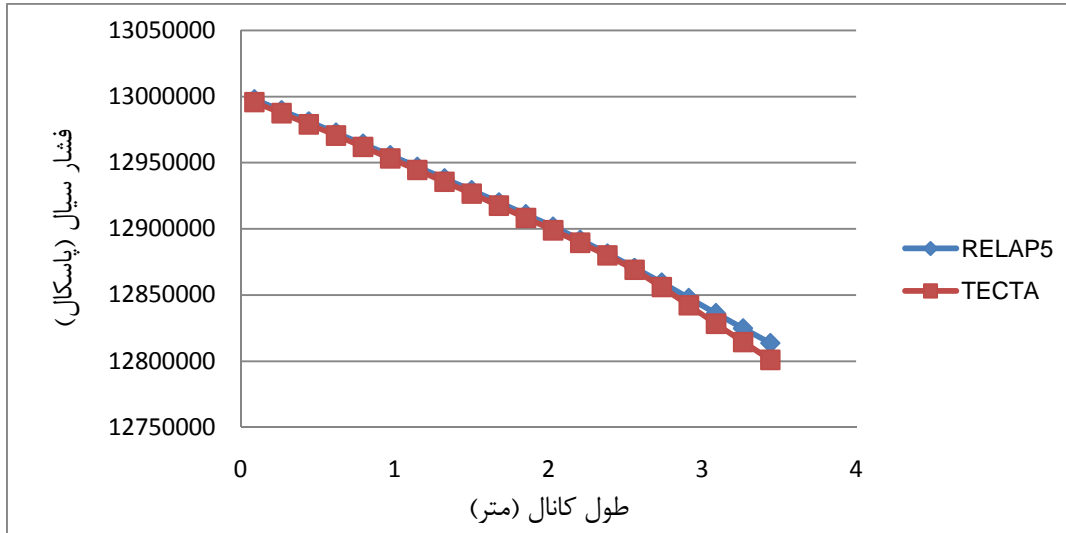
شکل ۹: تغییرات چگالی سیال در طول کانال

۸-۲-۳- توزیع سرعت سیال در طول کانال



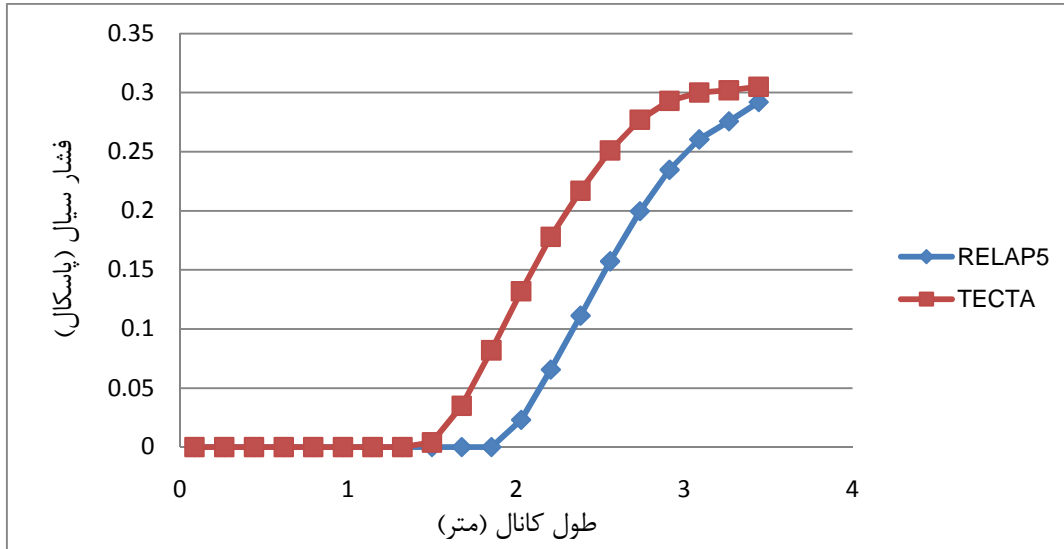
شکل ۱۰: تغییرات سرعت سیال در طول کانال

۸-۲-۴- توزیع فشار سیال در طول کانال



شکل ۱۱: تغییرات فشار سیال در طول کانال

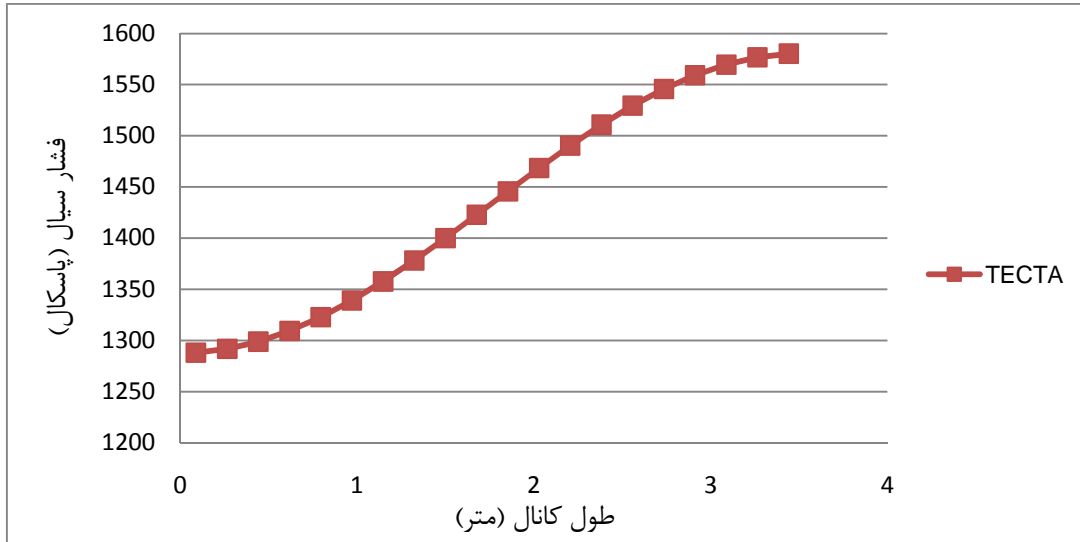
۸-۲-۵- توزیع کسر حجمی بخار در طول کانال



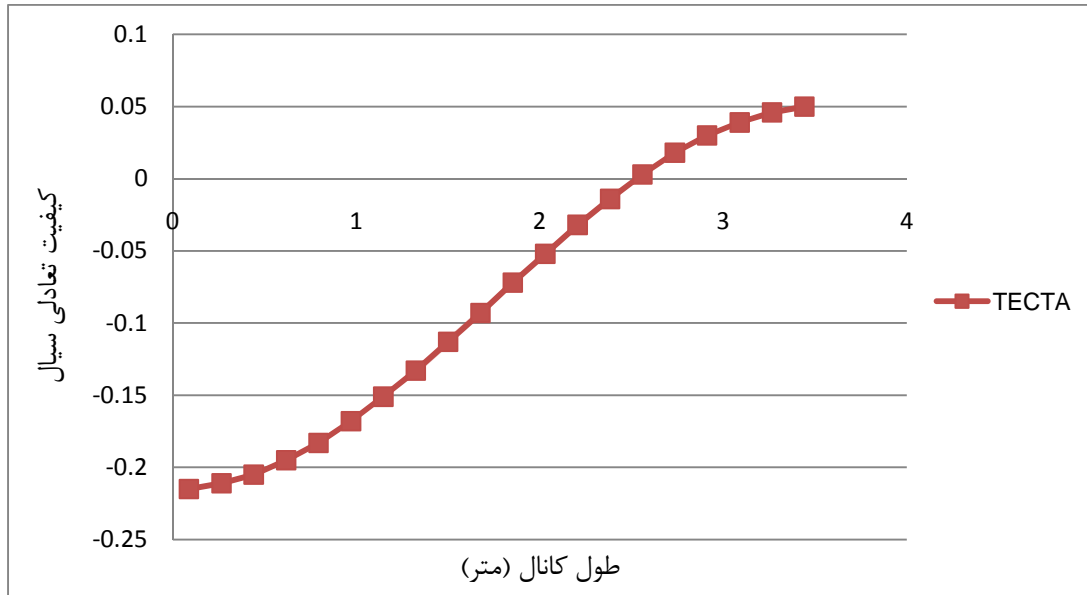
شکل ۱۲: تغییرات کسر حجمی بخار در طول کانال



۸-۲-۲-۶- توزیع آنتالپی و کیفیت تعادلی سیال در طول کانال

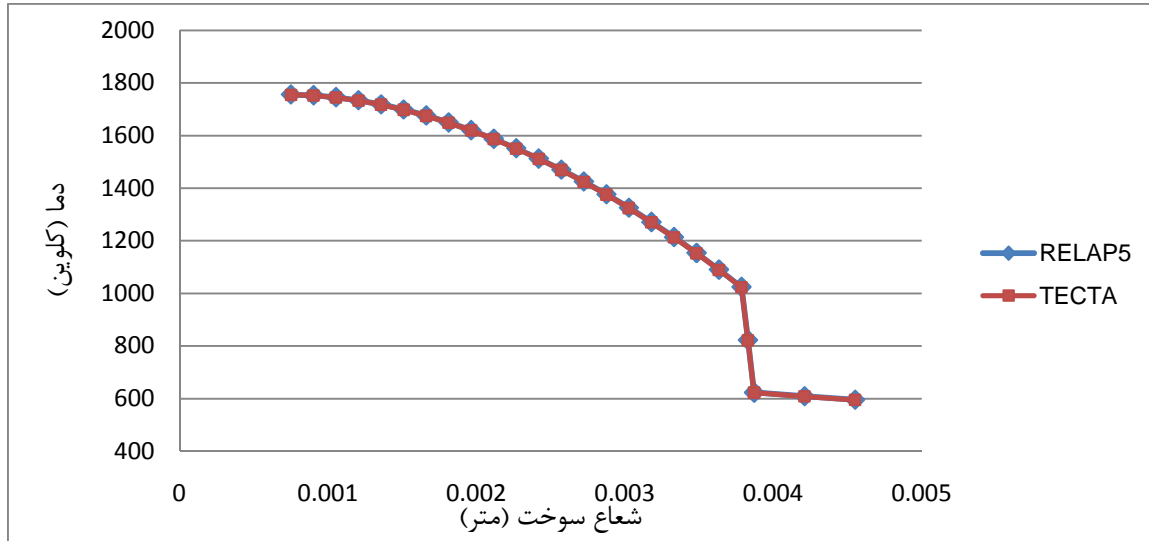


شکل ۱۳: تغییرات آنتالپی سیال در طول کانال



شکل ۱۴: توزیع دمای شعاعی در مقطع پنجم ارتفاعی میله سوخت

۸-۲-۷- توزیع دما در مقطع پنجم، دهم و پانزدهم ارتفاعی میله سوخت



شکل ۱۵: توزیع دمای شعاعی در مقطع پنجم ارتفاعی میله سوخت

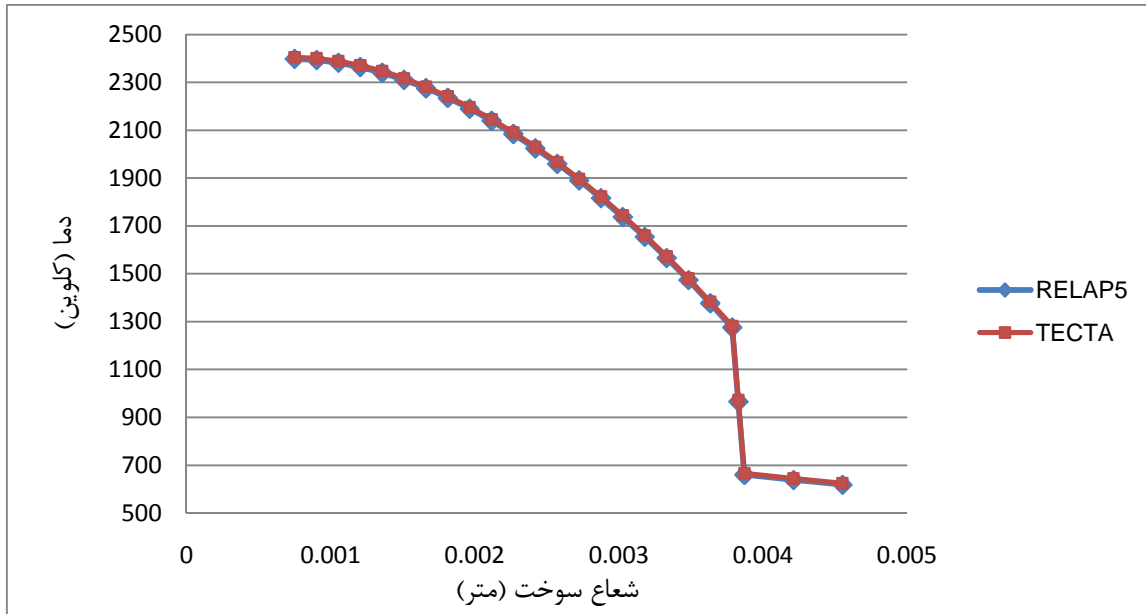
جدول شماره ۵: درصد خطای دمای محاسبه شده در مقطع پنجم نسبت به کد RELAP5

<b>Radius (m)</b>	0.00075	0.000902	0.001053	0.001205	0.001357	0.001509
<b>Error (%)</b>	0.04198	0.04387	0.044517	0.048163	0.052616	0.050215

<b>Radius (m)</b>	0.001661	0.001812	0.001964	0.002116	0.002267	0.002419
<b>Error (%)</b>	0.054657	0.1	0.057342	0.063941	0.062718	0.063347

<b>Radius (m)</b>	0.002571	0.002723	0.002875	0.003026	0.003178	0.00333
<b>Error (%)</b>	0.070127	0.074596	0.074599	0.082988	0.083779	0.091104

<b>Radius (m)</b>	0.003482	0.003633	0.003785	0.003828	0.00387	0.00421	0.00455
<b>Error (%)</b>	0.096031	0.097103	0.112044	0.136206	0.180856	0.1849	0.188619



شکل ۱۶: توزیع دمای شعاعی در مقطع دهم ارتفاعی میله سوخت

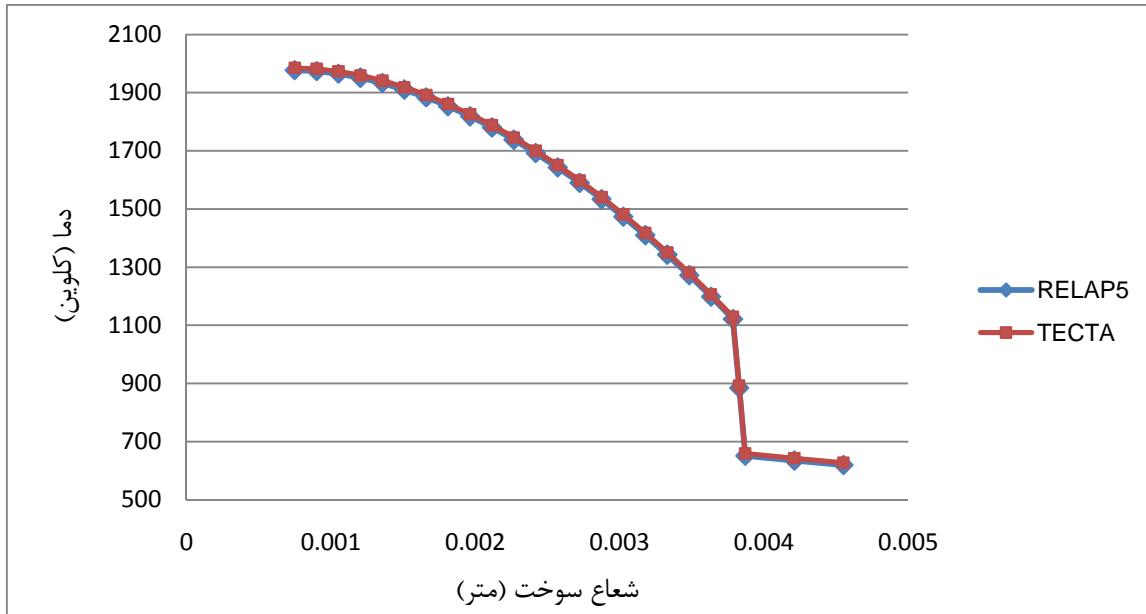
جدول شماره ۶: درصد خطای دمای محاسبه شده در مقطع دهم نسبت به کد RELAP5

<b>Radius (m)</b>	0.00075	0.000902	0.001053	0.001205	0.001357	0.001509
<b>Error (%)</b>	0.281288	0.277801	0.278093	0.278137	0.278768	0.282308

<b>Radius (m)</b>	0.001661	0.001812	0.001964	0.002116	0.002267	0.002419
<b>Error (%)</b>	0.282475	0.3	0.290137	0.295649	0.30367	0.312867

<b>Radius (m)</b>	0.002571	0.002723	0.002875	0.003026	0.003178	0.00333
<b>Error (%)</b>	0.321308	0.331411	0.345758	0.35524	0.373247	0.396425

<b>Radius (m)</b>	0.003482	0.003633	0.003785	0.003828	0.00387	0.00421	0.00455
<b>Error (%)</b>	0.420528	0.447357	0.479072	0.633692	0.92682	0.959352	0.98967



شکل ۱۷: توزیع دمای شعاعی در مقطع پانزدهم ارتفاعی میله سوخت

جدول شماره ۷: درصد خطای دمای محاسبه شده در مقطع پانزدهم نسبت به کد RELAP5

<b>Radius (m)</b>	0.00075	0.000902	0.001053	0.001205	0.001357	0.001509
<b>Error (%)</b>	0.416439	0.412078	0.414381	0.413857	0.415395	0.417482

<b>Radius (m)</b>	0.001661	0.001812	0.001964	0.002116	0.002267	0.002419
<b>Error (%)</b>	0.425068	0.4	0.437637	0.44211	0.452762	0.467262

<b>Radius (m)</b>	0.002571	0.002723	0.002875	0.003026	0.003178	0.00333
<b>Error (%)</b>	0.476475	0.494874	0.505967	0.531085	0.552451	0.578524

<b>Radius (m)</b>	0.003482	0.003633	0.003785	0.003828	0.00387	0.00421	0.00455
<b>Error (%)</b>	0.6116	0.645974	0.692267	0.871255	1.182914	1.213672	1.243325



## ۹- مراجع

1. John G. Collier, John R. Thome. "Convective Boiling and Condensation", 3<sup>rd</sup> Edition, 1994.
2. Basile, D., Beghi, M., Chierici, R., Salina, E., and Brega, E., "COBRA-EN Manual, an Upgraded Version of the COBRA-3C/MIT Code for Thermal-Hydraulic Transient Analysis of Light Water Reactor Fuel Assemblies and Cores", 1999.
3. The RELAP5 Code Development Team. "RELAP5/MOD3 Code Manual Volume IV: Models and Correlations", Idaho National Engineering Laboratory, 1<sup>st</sup> Edition, 1995.
4. Neil E. Todreas, Mujid S. Kazimi, "Nuclear System I", 1993.
5. "Thermophysical Properties of Materials for Water Cooled Reactors", IAEA-TECDOC-949, 1997.