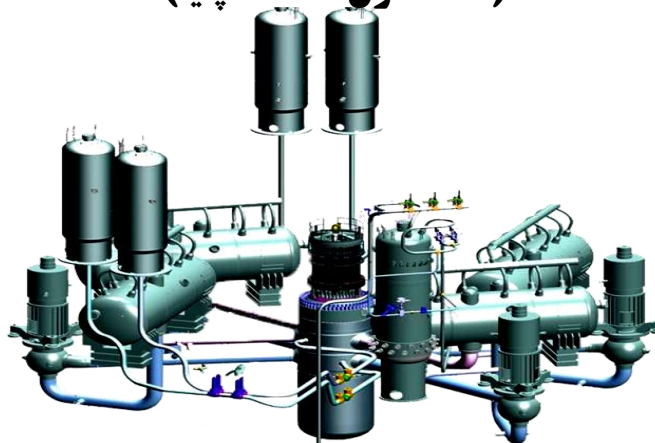


## کد تحلیل مدار ترموهیدرولیکی در نیروگاه‌های هسته‌ای آب سبک (نسخه اول : حالت پایا)



### گزارش فنی LOOP-I

بسته نوزدهم - ویرایش ۰ - مهر ۱۳۹۵

ANC-TEC-THL-SL-600

## فهرست مطالب

۸	۱- چکیده.....
۹	۲- کلیدواژه.....
۱۰	۳- اختصارات.....
۱۰	۴- مقدمه.....
۱۲	۵- دامنه گزارش.....
۱۲	۶- مدل‌های اجزای مدار.....
۱۰۹	۷- الگوریتم حل.....
۱۱۱	۸- قابلیت‌های کد.....
۱۱۳	۹- اعتبارسنجی.....
۱۵۸	۱۰- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری.....
۱۵۹	۱۱- مراجع.....

## لیست شکل‌ها

- شکل ۱: نمایی از سه گره مجاور در یک سازه حرارتی..... ۲۴
- شکل ۲: روندنمای حل برنامه کانال با مدل دوفاز همگن..... ۳۷
- شکل ۳: روندنمای حل برنامه کانال با مدل دوفاز شار رانشی..... ۳۸
- شکل ۴: نمای برش طولی از یک شیر فلکه..... ۴۴
- شکل ۵: نمای برش طولی از یک شیر دریچه‌ای..... ۴۵
- شکل ۶: نمای برش طولی از یک شیر یک طرفه..... ۴۶
- شکل ۷: نمای برش طولی از یک شیر زاویه‌ای..... ۴۷
- شکل ۸: نمایی از زانویی ۹۰ درجه با شعاع انحنای بزرگ..... ۴۹
- شکل ۹: تغییرات ضریب افت فشار در زانویی با شعاع انحنای بزرگ..... ۵۰
- شکل ۱۰: تغییرات ضریب افت فشار برای انقباض و انبساط ناگهانی جریان برحسب نسبت قطرها..... ۵۲

- شکل ۱۱: تغییرات ضریب افت در دیفیوزر بر حسب زاویه مخروطی..... ۵۵
- شکل ۱۲: خروجی با لبه متداخل و ضریب افت فشار بر حسب طول بخش متداخل به قطر..... ۵۷
- شکل ۱۳: خروجی با لبه زاویه‌دار و لبه گرد شده و ضریب افت فشار..... ۵۸
- شکل ۱۴: منحنی هد چهار ناحیه‌ای برای پمپ‌های MOD1 (ANC-A-2083) [۳]..... ۶۶
- شکل ۱۵: منحنی چهار ناحیه‌ای گشتاور برای پمپ‌های MOD1 (ANC-A-3449) [۳]..... ۶۷
- شکل ۱۶: منحنی متشابه هد بر اساس پارامترهای بی‌بعد [۳]..... ۷۰
- شکل ۱۷: منحنی متشابه گشتاور بر اساس پارامترهای بی‌بعد [۳]..... ۷۱
- شکل ۱۸: روندنمای مدل پمپ..... ۷۳
- شکل ۱۹: نمایی از یک انشعاب با یک ورودی و دو خروجی..... ۷۶
- شکل ۲۰: نمایی از راکتور فرضی با بخش پایینی، کانال‌های قلب و بخش بالایی..... ۷۷
- شکل ۲۱: روندنمای مدل انشعاب..... ۸۷
- شکل ۲۲: الگوی گردش جریان در پوسته یک مولد بخار..... ۹۲

- شکل ۲۳: فاصله افقی و عمودی بین لوله‌های مولد بخار..... ۹۵
- شکل ۲۴: حجم‌بندی دسته لوله‌ها در راستای عمودی (هر کانال یک حجم در بخش پوسته و لوله)..... ۱۰۲
- شکل ۲۵: حجم‌بندی دسته لوله‌ها در راستای افقی..... ۱۰۳
- شکل ۲۶: روندنمای کلی حل مدل مولد بخار..... ۱۰۶
- شکل ۲۷: روندنمای حل حالت تکفاز مولد بخار..... ۱۰۷
- شکل ۲۸: روندنمای حل حالت دوفاز مولد بخار..... ۱۰۸
- شکل ۲۹: روندنمای برنامه مدار..... ۱۱۰
- شکل ۳۰: حجم‌بندی مربوط به مسأله با دو مدار..... ۱۱۴
- شکل ۳۱: توزیع دمای سیال در طول کانال‌های قلب راکتور در مسأله چهار مدار..... ۱۴۲
- شکل ۳۲: توزیع سرعت سیال در طول کانال‌های قلب راکتور در مسأله چهار مدار..... ۱۴۳
- شکل ۳۳: توزیع چگالی در طول کانال‌های قلب راکتور در مسأله چهار مدار..... ۱۴۴
- شکل ۳۴: دمای سطح غلاف در طول کانال‌های قلب راکتور در مسأله چهار مدار..... ۱۴۵

- شکل ۳۵: توزیع دمای مرکز سوخت در طول کانال‌های قلب راکتور در مسأله چهار مدار..... ۱۴۶
- شکل ۳۶: توزیع دمای شعاعی در میله سوخت کانال ۲۱۸ در سه سطح در مسأله چهار مدار..... ۱۴۷
- شکل ۳۷: توزیع دمای شعاعی در میله سوخت کانال ۲۱۹ در سه سطح در مسأله چهار مدار..... ۱۴۸
- شکل ۳۸: توزیع دمای شعاعی در میله سوخت کانال ۲۲۰ در سه سطح در مسأله چهار مدار..... ۱۴۹
- شکل ۳۹: توزیع دما در کانال‌های قلب راکتور در مسأله سه مدار..... ۱۵۱
- شکل ۴۰: توزیع سرعت سیال در کانال‌های قلب راکتور در مسأله سه مدار..... ۱۵۲
- شکل ۴۱: توزیع چگالی در کانال‌های قلب راکتور در مسأله سه مدار..... ۱۵۳
- شکل ۴۲: توزیع دمای سیال در کانال‌های قلب راکتور در مسأله دو مدار..... ۱۵۵
- شکل ۴۳: توزیع چگالی سیال در کانال‌های قلب راکتور در مسأله دو مدار..... ۱۵۶
- شکل ۴۴: توزیع کسر حجمی بخار در کانال‌های قلب راکتور در مسأله دو مدار..... ۱۵۷

## لیست جدول‌ها

- جدول شماره ۱: ضریب افت فشار برای برخی شیرها و اتصالات زاویه دار..... ۴۸
- جدول شماره ۲: نمونه ضریب افت فشار در مقطع انقباض جریان ملایم..... ۵۶
- جدول شماره ۳: تعریف پارامترهای منحنی‌های متشابه پمپ..... ۶۸
- جدول شماره ۴: ضرایب مورد نیاز برای محاسبه ضریب جابجایی حرارتی جریان تکفاز در بخش ثانویه مولد بخار..... ۱۰۱
- جدول شماره ۵: اجزای به کار رفته در مسأله..... ۱۱۵
- جدول شماره ۶: پارامترهای هیدرولیکی محاسبه شده و نتایج کد RELAP5 در مسأله چهار مدار نیروگاه بوشهر..... ۱۲۳
- جدول شماره ۷: توزیع دمای محاسبه شده در سازه‌های حرارتی مسأله چهار مدار و نتایج کد RELAP5..... ۱۳۱
- جدول شماره ۸: مقایسه پارامترهای ارائه شده در گزارش نهایی تحلیل ایمنی نیروگاه بوشهر با مقادیر محاسبه شده..... ۱۴۱

## ۱- چکیده

کد LOOP-I به منظور مدل‌سازی شرایط ترموهیدرولیکی در مدار اولیه نیروگاه‌های هسته‌ای و راکتورهای تحقیقاتی آب سبک توسعه داده شده است. بدین منظور در مرحله اول کدی با قابلیت مدل‌سازی اجزای اصلی مدار شامل لوله‌ها، اتصالات، پمپ، قلب راکتور و مولد بخار در حالت پایا ارائه شده است. اجزای اصلی مدار نیروگاهی توسط اجزای تعریف شده در کد مانند لوله، کانال، انشعاب، تک حجم، اتصالات، انشعاب، پمپ و مولد بخار مدل‌سازی می‌شوند. در برنامه اصلی اجزای انتخاب شده توسط کاربر و پارامترهای ورودی مربوطه، خوانده شده و برنامه مدل مربوط به آن فراخوانی و نتایج حاصل نمایش داده می‌شوند. قابلیت‌های متعددی در کد LOOP-I در نظر گرفته شده است. از جمله این قابلیت‌ها امکان استفاده از انواع اتصالات ساده، شیرها، زانویی‌ها و ...، امکان مدل‌سازی پمپ با مشخصات دلخواه کاربر و دو پمپ پیش‌فرض در کد، امکان مدل‌سازی مولد بخار با تعیین تعداد دسته لوله‌های بخش اولیه، گام افقی و گام عمودی دسته لوله‌ها توسط کاربر، امکان مدل‌سازی راکتور به همراه یک یا چند مدار مجزا، انتخاب تعداد دلخواه گره شعاعی در سوخت، غلاف سوخت و فاصله‌گذاری برای به دست آوردن توزیع دما، انتخاب ضریب رسانش سازه حرارتی بصورت عدد ثابت یا استفاده از تابع ضریب رسانش حرارتی بر حسب دما بصورت پیش‌فرض در کد، امکان تعیین ضرایب توزیع توان محوری در طول میله سوخت، امکان مدل‌سازی تیغه سوخت به جای میله سوخت برای



راکتورهای با سوخت تیغه‌ای، امکان انتخاب روش حل هیدرولیکی سیال دوفاز به دو روش همگن و شار رانشی، امکان مدل‌سازی انشعاب با حداکثر ۱۰ اتصال ورودی و ۱۰ اتصال خروجی و سایر قابلیت‌های دیگر می‌باشد. در مدل‌های اجزای مختلف بجز اتصالات، محاسبات ترموهیدرولیکی سیال با استفاده از معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی در حالت پایا انجام می‌شود. این کد قابلیت مدل‌سازی هر تعداد مدار اولیه بکار رفته در نیروگاه‌های هسته‌ای مانند نیروگاه هسته‌ای بوشهر را دارد. هر یک از مدارها می‌توانند دارای یک پمپ و یک مولد بخار باشند. همچنین می‌توان با کمک این کد مدارها و قلب راکتورهای تحقیقاتی را مدل‌سازی نمود. به منظور بررسی صحت عملکرد کد، مسائلی بر اساس هندسه نیروگاه هسته‌ای بوشهر تهیه و نتایج حاصل با نتایج حاصل از کد RELAP5 مقایسه گردیده است. با افزودن قابلیت حل حالت گذرا، نسخه دوم این کد تحت عنوان کد LOOP-II در آینده ارائه خواهد شد.

## ۲- کلیدواژه

برنامه ترموهیدرولیکی مدار، حالت پایا، کانال استوانه‌ای و تیغه‌ای، تک حجم، اتصال، انشعاب، پمپ، مولد بخار، مدل جریان دوفاز همگن و شار رانشی.

## ۳- اختصارات

توضیح	عبارت اختصاری	عبارت
کد تحلیل ترموهیدرولیک در مدار نیروگاه‌های هسته‌ای آب سبک	LOOP	Thermohydraulic LWR Loop Analysis Code

## ۴- مقدمه

کد ارائه شده به عنوان اولین اقدام در راستای دستیابی به یک سیستم کد محاسبات ترموهیدرولیکی در مدارهای نیروگاه هسته‌ای می‌باشد. در این برنامه محاسباتی، پارامترهای ترموهیدرولیکی در اجزای مدار اول نیروگاه هسته‌ای و راکتورهای تحقیقاتی آب سبک با استفاده از مدل‌های جریان دوفاز همگن و شار رانشی در حالت پایا محاسبه می‌شوند. اجزای مدار توسط مدل‌های تک حجم، کانال، انشعاب، پمپ، اتصالات و مولد بخار مدل‌سازی می‌شوند و مشخصات ترموهیدرولیکی در حالت پایا در هر یک 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، لذا

بررسی جریان سیال دوفاز از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. با گذر سیال از میان کانال و برداشت حرارت از دیواره کانال رژیم‌های متفاوت دوفاز ایجاد می‌شود. برای شبیه‌سازی هر یک از این رژیم‌ها روابط نیمه تجربی مختلفی ارائه شده است. این روابط در محدوده‌های خاصی از پارامترهای ترموهیدرولیکی معتبر می‌باشند. در مدل جریان همگن 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. در مدل همگن جریان دو فاز به عنوان یک جریان تک فاز با خواص میانگین سیال در نظر گرفته می‌شود. در مدل شار رانشی علاوه بر معادلات بقای سه گانه از معادله بقای جرم بخار برای محاسبه کسر حجمی بخار استفاده می‌شود. همچنین در این مدل سرعت فاز بخار با سرعت فاز مایع برابر در نظر گرفته نمی‌شود و بر اساس نسبت لغزش حاصل از روابط کمکی، این دو سرعت محاسبه می‌گردد. 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

گزارش شامل ارائه کد محاسباتی برای محاسبه پارامترهای ترموهیدرولیکی در مدار اول نیروگاه‌های هسته‌ای و راکتورهای تحقیقاتی شامل اجزای کانال مستطیلی (با تیغه سوخت)، لوله (با میله سوخت)، انشعاب، اتصالات، تک حجم، پمپ و مولد بخار، با استفاده از مدل‌های جریان دوفاز همگن و شار رانشی می‌باشد.

## ۶- مدل‌های اجزای مدار

برای مدلسازی مدار از اجزای مختلف بکار رفته در کد استفاده می‌شود. این اجزا شامل مدل‌های ساده شده برای مدلسازی رفتار جریان در مدار واقعی است و شامل تک حجم، کانال، انشعاب، اتصالات و پمپ می‌شود.

## ۶-۱- مدل کانال

اساسی ترین جزء بکار رفته در این کد مدل کانال است که شامل هندسه کانال استوانه‌ای برای مدل‌سازی خطوط لوله و کانال‌های تولید توان در راکتورهای هسته‌ای مانند راکتور بوشهر و نوع غربی آن و همچنین کانال مستطیلی برای مدل‌سازی کانال‌های تولید توان در راکتورهایی مانند راکتور تحقیقاتی تهران است. مدل کانال قابلیت تحلیل تولید توان در سازه حرارتی میله‌هایی مانند میله سوخت نیروگاه بوشهر و تیغه سوخت راکتور تحقیقاتی تهران را دارد. در مدل محاسباتی سیال از روش اختلاف محدود استفاده می‌شود. در این مدل دو روش تحلیل جریان دوفاز همگن و شار رانشی بکار رفته است. حل معادله رسانش حرارتی در هندسه‌های استوانه و تیغه نیز به روش اختلاف محدود بکار رفته در کد RELAP5 انجام می‌شود. در مدل کانال معادلات بقای سه‌گانه جرم، مومنتوم و انرژی در طول کانال حل می‌شوند و توزیع پارامترهای ترموهیدرولیکی مانند دما، فشار، آنتالپی، چگالی، سرعت و کسر حجمی بخار ارائه می‌شود. هر کانال می‌تواند به تعداد دلخواهی حجم محوری توسط کاربر تقسیم شود. در مدل کانال امکان تعریف کانال‌هایی که با محور افق زاویه‌های صفر، ۹۰ و ۲۷۰ درجه می‌سازند وجود دارد. مقادیر پارامترها در مرزهای ورودی و خروجی حجم‌ها محاسبه شده و مقادیر مرکز حجم‌ها بصورت میانگین خطی مقادیر ورودی و خروجی ارائه می‌شود. در این مدل معادلات بقای سه‌گانه برای جریان دو فاز همگن به کار رفته‌اند.

در مدل کانال برای تعریف بخش تولید حرارت و بدست آوردن توزیع دما در آن بخش، از سازه حرارتی استفاده شده است. در بخش سازه حرارتی که عموماً برای مدلسازی میله یا تیغه‌های سوخت به کار می‌روند معادله رسانش حرارتی با شرایط مرزی عایق در مرکز سازه حرارتی و جابجایی حرارتی در مرز سیال حل می‌شود. در برنامه ارائه شده امکان انتخاب دو هندسه استوانه‌ای برای میله سوخت و تیغه‌ای برای تیغه سوخت ارائه شده است.

۶-۱-۱- معادلات بقای جرم، انرژی و مومنتم

در این بخش خلاصه‌ای از معادلات بقای جرم، مومنتم و انرژی برای جریان دوفاز با مدل‌های همگن و شار رانشی ارائه می‌شود. معادله‌ی بقای جرم بکار رفته در مدل همگن بصورت زیر است [۴].

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial G_m}{\partial z} = 0 \quad (1-6)$$

معادله‌ی بقای مومنتوم استفاده شده در مدل همگن بصورت زیر است [۴].

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

معادله‌ی بقای انرژی مدل همگن بصورت زیر است [۴].

$$\frac{\partial (\rho_m h_m)}{\partial t} + \frac{\partial (G_m h_m)}{\partial z} = \frac{q'' P_h}{A_z} + \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{G_m}{\rho_m} \left[ \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{f_{TP} G_m^2}{2D_e \rho_m} \right] \quad (۳-۶)$$

در روابط بالا،  $\rho_m$  چگالی مخلوط مایع و بخار و  $G_m$  سرعت جرمی مخلوط مایع و بخار،  $g$  شتاب جاذبه،  $f_{TP}$  ضریب اصطکاک دو فاز،  $D_e$  قطر هیدرولیکی کانال و  $p$  فشار سیال،  $h_m$  آنتالپی مخلوط،  $q''$  شار حرارتی،  $A_z$  سطح مقطع کانال و  $P_h$  محیط کانال است.

در مدل شار رانشی بکار رفته در این برنامه از چهار معادله استفاده می‌شود. سه معادله مربوط به بقای جرم، مومنتوم و انرژی مخلوط دوفاز و یک معادله مربوط به بقای جرم بخار می‌باشد. معادله بقای جرم مخلوط مشابه رابطه (۶-۱) است. معادله بقای مومنتوم مخلوط در مدل شار رانشی بصورت زیر است [۵].

$$\frac{\partial G_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{G_m^2}{\rho_m} \right) = - \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{f_{TP} G_m^2}{2D_e \rho_m} - \rho_m g - \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{\alpha \rho_g \rho_l}{(1-\alpha) \rho_m} \overline{V}_{gj}^2 \right] \quad (4-6)$$

$\overline{V}_{gj}$  سرعت رانش<sup>۱</sup> متوسط فاز گاز است که از رابطه (۵-۶) بدست می‌آید. با مقایسه رابطه (۴-۶) با (۲-۶) مشاهده می‌شود که تنها تفاوت موجود مربوط به ترم افت مومنوم حاصل از اختلاف سرعت بین دوفاز است.

$$\overline{V}_{gj} = \frac{\rho_m (V_{gj} + (C_0 - 1)v_m)}{\rho_m - (C_0 - 1)\alpha(\rho_l - \rho_g)} \quad (5-6)$$

$$v_g = v_m + \frac{\rho_l}{\rho_m} \overline{V}_{gj} \quad (6-6)$$

---

1 - Drift



$$v_l = v_m - \frac{\alpha \rho_g}{(1-\alpha)\rho_m} \bar{V}_{gj} \quad (7-6)$$

معادله‌ی بقای انرژی در مدل شار رانشی بصورت زیر است [۵].

$$\frac{\partial(\rho_m h_m)}{\partial t} + \frac{\partial(G_m h_m)}{\partial z} = \frac{q'' P_h}{A_z} + \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \frac{\alpha \rho_g \rho_l}{\rho_m} (h_g - h_l) \bar{V}_{gj} - \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{\alpha \rho_g \rho_l}{\rho_m} (h_g - h_l) \bar{V}_{gj} \right] \quad (8-6)$$

$$\left[ v_m + \frac{\alpha(\rho_l - \rho_g)}{\rho_m} \bar{V}_{gj} \right] \frac{\partial p}{\partial z}$$

معادله بقای جرم فاز گاز نیز بصورت زیر است [۵].

$$\frac{\partial(\rho_g \alpha)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_g \alpha v_m)}{\partial z} = \Gamma - \frac{\partial}{\partial z} \left[ \frac{\alpha \rho_g \rho_l}{\rho_m} \bar{V}_{gj} \right] \quad (9-6)$$

در روابط فوق  $v_g$ ،  $v_l$  و  $v_m$  به ترتیب سرعت بخار، سرعت مایع و سرعت متوسط مخلوط هستند.  $\rho_g$  چگالی گاز و  $\Gamma$  پارامتر مربوط به میزان تولید بخار است. توضیحات تفصیلی در مرجع [۵] ارائه شده است.

۶-۱-۲- روابط کمکی بخش هیدرودینامیکی

۶-۱-۲-۱- 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 [۱].

$$f_{TP} = f_0 \times \left[ 1 + x \frac{v_{fg}}{v_f} \right] \times \left[ 1 + x \left( \frac{\mu_{fg}}{\mu_g} \right) \right]^{-1/4} \quad (۱۰-۶)$$

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 تک‌فاز و  $f_{TP}$ ، ضریب اصطکاک دوفاز است.

#### ۶-۱-۲-۲- 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 پیش بینی کیفیت در جریان مادون سرد و همچنین جریان اشباع استفاده شده است. این روابط در ادامه ارائه شده است [۲].

$$\begin{cases} x = x_e - x_d \exp\left(\frac{x_e}{x_d} - 1\right), & x_e \geq x_d \\ x = 0, & x_e < x_d \end{cases} \quad (۱۱-۶)$$

$$x_d = -\frac{C_{p_f} \Delta T_d}{h_{fg}} \quad (12-6)$$

$$Y_B^+ = \frac{0.015 \left[ \frac{\sigma D_h}{v_f} \right]^{1/2}}{\mu_f} \quad (13-6)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta T_d = \frac{q'}{P_h H_f} - Q \text{Pr} Y_B^+, \quad 0 \leq Y_B^+ \leq 5 \\ \Delta T_d = \frac{q'}{P_h H_f} - 5Q \left[ \text{Pr} + \ln \left[ 1 + \text{Pr} \left( \frac{Y_B^+}{5} - 1 \right) \right] \right], \quad 5 < Y_B^+ < 30 \\ \Delta T_d = \frac{q'}{P_h H_f} - 5Q \left[ \text{Pr} + \ln(1 + \text{Pr}) + 0.5 \ln \left( \frac{Y_B^+}{30} \right) \right], \quad 30 \leq Y_B^+ \end{array} \right. \quad (14-6)$$

$$Q = \frac{q'}{P_h C_{p_f} (\rho_f \tau_w)^{1/2}} \quad (15-6)$$

$$\tau_w = 0.125 f v_f G^2 \quad (16-6)$$

$$H_f = 0.023 \text{Re}_f^{0.8} \text{Pr}_f^{0.4} \frac{k_f}{D_h} \quad (17-6)$$

$$\alpha = \frac{x v_g}{(1-x) v_f S + x v_g} \quad (18-6)$$

در روابط فوق،  $x$  کیفیت غیر تعادلی،  $x_e$  کیفیت تعادلی،  $C_{p_f}$  ظرفیت گرمایی مایع اشباع،  $h_{fg}$  آنتالپی اشباع،  $D_h$  قطر هیدرولیکی،  $\sigma$  کشش سطحی سیال،  $\mu_f$  لزجت مایع اشباع،  $v_f$  و  $v_g$  حجم مخصوص مایع و بخار،  $q'$  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 ۶-۱۸ استفاده شده است. در جریان همگن مقدار پارامتر  $S$  برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود.

$$S = 0.4 + 0.6 \left[ \frac{0.4 + x \left( \frac{v_g}{v_f} - 0.4 \right)}{0.4 + 0.6x} \right]^{1/2} \quad (19-6)$$

هر دو حالت مدل جریان همگن ( $S=1$ ) و رابطه ۶-۱۹ 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>۲</sup> و اسلاگ<sup>۳</sup>،  $\alpha_{SA}$  کسر حجمی بخار مرزی بین رژیم جریان اسلاگ و حلقوی<sup>۴</sup> و  $\alpha_{AM}$  کسر حجمی بخار مرزی بین رژیم جریان حلقوی و قطرات آب معلق<sup>۵</sup> (پیش از شار حرارتی بحرانی). روابط ارائه شده برای این مقادیر در مرجع [۳] آمده است.

- 
- 2 - Bubbly
  - 3 - Slug
  - 4 - Annular
  - 5 - Mist-Annular

## ۶-۱-۳- حل معادله انتقال حرارت به روش اختلاف محدود

در حل معادله رسانش حرارتی بروش اختلاف محدود بکار رفته، هر بازه مکانی ممکن است طول و جنس متفاوتی داشته باشد و تولید حرارت ممکن است در هر بازه مکانی تغییر کند. شرایط مرزی بصورت مرز عایق در مرکز و انتقال حرارت جابجایی از سطح در نظر گرفته شده است. بدین صورت که مرز داخلی سازه حرارتی که معمولاً مرکز سوخت است بصورت مرز عایق با شار حرارتی صفر و مرز خارجی که در تماس با سیال خنک کننده است بصورت انتقال حرارت جابجایی در نظر گرفته شده است. فرم انتگرالی معادله رسانش حرارتی در نظر گرفته شده بصورت زیر است [۲].

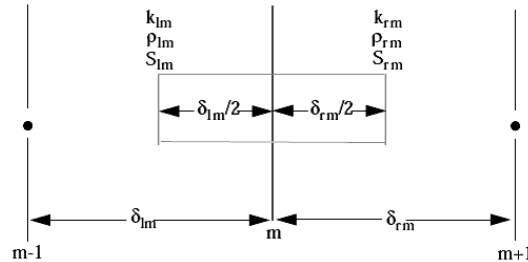
$$\iiint_V \rho(T, \bar{x}) \frac{\partial T}{\partial t}(\bar{x}, t) dV = \iint_s k(T, \bar{x}) \bar{\nabla} T(\bar{x}, t) d\bar{s} + \iiint_V S(\bar{x}, t) dV \quad (۲۰-۶)$$

در معادله فوق،  $k$  ضریب رسانش حرارتی،  $s$  سطح انتقال حرارت،  $S$  چشمه حرارتی داخلی،  $t$  زمان،  $T$  دما،  $V$  حجم،  $x$  بعد مکان و  $\rho$  ظرفیت گرمایی حجمی است.

با انتگرال گیری از معادله (۲۰-۶) رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$\frac{(T_m^{n+1} - T_m^n)G_m}{\Delta t} = -(T_m - T_{m-1})k_{lm}\delta_{lm}^s + (T_{m+1} - T_m)k_{rm}\delta_{rm}^s + P_f P(t)(Q_{lm}\delta_{lm}^v + Q_{rm}\delta_{rm}^v) \quad (21-6)$$

شکل ۱ سه گره را نشان می‌دهد. اندیس‌های پارامترهای تعیین شده موقعیت‌های چپ و راست و شماره گره را مشخص می‌کنند. پارامتر  $\bar{\delta}$  طول هر بازه است که می‌تواند متغیر باشد. بین گره‌ها پارامترهای حرارتی  $k$  و  $\rho$  و چشمه گرمایی،  $S$ ، ثابت فرض می‌شوند ولی مقادیر چپ و راست این پارامترها می‌توانند متفاوت باشند.



شکل ۱: نمایی از سه گره مجاور در یک سازه حرارتی



با استفاده از عبارت  $\zeta_m$  به جای ترم سمت راست رابطه (۶-۲۱) داریم:

$$\frac{(T_m^{n+1} - T_m^n)G_m}{\Delta t} = \zeta_m \quad (۶-۲۲)$$

برای حل حالت پایا  $\zeta_m = 0$  است. در حالت وابسته به زمان می‌توان نوشت:

$$\frac{(T_m^{n+1} - T_m^n)G_m}{\Delta t} = w\zeta_m^{n+1} + (1-w)\zeta_m^n \quad (۶-۲۳)$$

در این رابطه اگر  $w$  برابر صفر باشد یک فرمول صریح و در صورتی که مخالف صفر باشد فرمول ضمنی یا نیمه ضمنی حاصل می‌شود. پس از مرتب کردن رابطه بر اساس دما در گره‌ها رابطه (۶-۲۳) بصورت رابطه (۶-۲۴) نوشته می‌شود.

$$a_m^n T_{m-1}^{n+1} + b_m^n T_m^{n+1} + c_m^n T_{m+1}^{n+1} = d_m \quad (۶-۲۴)$$

$$a_m^n = -\frac{k_{lm}^n \delta_{lm}^s \Delta t}{\sigma + 1} \quad (25-6)$$

$$b_m^n = \sigma G_m^n - a_m^n - c_m^n \quad (26-6)$$

$$c_m^n = -\frac{k_{rm}^n \delta_{rm}^s \Delta t}{\sigma + 1} \quad (27-6)$$

$$d_m^n = -\sigma a_m^n T_{m-1}^n + \sigma (G_m^n + a_m^n + c_m^n) T_m^n - \sigma c_m^n T_{m+1}^n + \Delta t P_f \left( \frac{P^{n+1} + \sigma P^n}{\sigma + 1} \right) (Q_{lm} \delta_{lm}^v + Q_{rm} \delta_{rm}^v) \quad (28-6)$$

در حالت گذرا مقدار  $\sigma$  برابر ۱ و  $\Delta t$  گام زمانی است و در حالت پایا مقدار  $\sigma$  برابر صفر و  $\Delta t$  برابر ۱ است. لازم به ذکر است، مقدار ۱ در حل حالت پایا به عنوان گام زمانی یا حد بالای گام زمانی نبوده و به منظور اصلاح روابط فوق برای حل حالت پایا در نظر گرفته می‌شود.

پارامترهای معادله در هندسه‌های مختلف بصورت زیر است. برای هندسه تیغه‌ای پارامترهای هندسی عبارتند از:

$$\delta_{lm}^v = \frac{\delta_{lm}}{2}, \delta_{rm}^v = \frac{\delta_{rm}}{2}, \delta_{lm}^s = \frac{1}{\delta_{lm}}, \delta_{rm}^s = \frac{1}{\delta_{rm}}, \delta_m^b = 1 \quad (۲۹-۶)$$

برای هندسه استوانه‌ای پارامترهای هندسی عبارتند از:

$$\delta_{lm}^v = 2\pi \frac{\delta_{lm}}{2} \left( x_m - \frac{\delta_{lm}}{4} \right), \delta_{rm}^v = 2\pi \frac{\delta_{rm}}{2} \left( x_m + \frac{\delta_{rm}}{4} \right),$$

$$\delta_{lm}^s = \frac{2\pi}{\delta_{lm}} \left( x_m - \frac{\delta_{lm}}{2} \right), \delta_{rm}^s = \frac{2\pi}{\delta_{rm}} \left( x_m + \frac{\delta_{rm}}{2} \right), \quad (۳۰-۶)$$

$$\delta_m^b = 2\pi x_m$$

برای هندسه کره‌ای پارامترهای هندسی عبارتند از:

$$\delta_{lm}^v = \frac{4\pi}{3} \left( x_m^3 - \left[ x_m - \frac{\delta_{lm}}{2} \right]^3 \right), \delta_{rm}^v = \frac{4\pi}{3} \left( \left[ x_m + \frac{\delta_{rm}}{2} \right]^3 - x_m^3 \right),$$

$$\delta_{lm}^s = \frac{4\pi}{\delta_{lm}} \left( x_m - \frac{\delta_{lm}}{2} \right)^2, \delta_{rm}^s = \frac{4\pi}{\delta_{rm}} \left( x_m + \frac{\delta_{rm}}{2} \right)^2, \quad (31-6)$$

$$\delta_m^b = 4\pi x_m^2$$

و برای همه هندسه‌ها داریم:

$$G_m = \rho_{lm} \delta_{lm}^v + \rho_{rm} \delta_{rm}^v \quad (32-6)$$

عبارت‌های  $V$  و  $S$  مربوط به حجم و سطح می‌باشند. عبارت  $\delta_m^b$  در مرز خارجی بکار می‌رود.

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 آلومینیوم)، فاصله گازی (هلیوم) و غلاف (زیرکونیوم و آلومینیوم) بصورت 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 بکار رفته در کد COBRA-EN در نظر گرفته شده است [۲].

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

$$w = A + 1.216 \times 10^{-4} \times e^{(1.867 \times 10^{-3} \times T)} \quad (۳۳-۶)$$

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

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

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

$$K = 2.639 \times 10^{-3} \times T^{0.7085} \quad (34-6)$$

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 بصورت زیر است.

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

$$K = \frac{1.6056 \times 10^{-4} \times w}{1.604972 \times 10^{-4}} \quad (35-6)$$

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 [۶].

$$K = 180.26 - 2.29 \times 10^{-2} \times T \quad (36-6)$$

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 بصورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$K = 130 \times e^{-\left(\frac{T-196.3}{343}\right)^2} + 213.1 \times e^{-\left(\frac{T-759.9}{599.7}\right)^2} \quad (37-6)$$

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

۶-۱-۴- 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.

## ۶-۱-۴-۱- ضریب جابجایی حرارتی

برای محاسبه ضریب جابجایی حرارتی سیال آشفته‌ی تک‌فاز از معادله Dittus-Boelter (۶-۳۸) استفاده می‌شود. این معادله شامل دو ضریب است. یکی از دو ضریب مشابه عدد رینولدز است و بیانگر نسبت انتقال مومنوم به نیروی لزجت است و ضریب دوم مشابه عدد پرانتل است که بیانگر نسبت پخش مومنوم به پخش حرارتی است.

$$a = \left[ \frac{\rho V D}{\mu} \right]^{0.8}$$

$$b = \left[ \frac{C_p \mu}{k} \right]^{1/3} \quad (۶-۳۸)$$

$$h_{conv\_sub} = \frac{0.023K}{D} \times a \times b$$

برای محاسبه‌ی ضریب جابجایی حرارتی سیال دوفاز از رابطه Chen استفاده شده است. در این رابطه 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 [۱]:



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

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

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

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

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

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

(۳۹-۶)

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 جوش 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.

$$h_{conv,TP} = h_{mac} \times F + h_{mic} \times S \quad (۴۰-۶)$$

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. پارامتر  $S$  ضریب تصحیح است که از نمودار ذکر شده در مرجع [۱] و یا رابطه (۴۱-۶) بدست می‌آید. همچنین ضریب  $F$  در رابطه (۴۰-۶) از رابطه (۴۱-۶) بدست می‌آید.

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

$$\text{Re}_{TP} = \min(70, \text{Re}_f \times F^{1.25} \times 10^{-4}) \quad (41-6)$$

$$F = 2.35 \times (x_u^{-1} + 0.213)^{0.736}$$

$$x_u^{-1} = \left(\frac{G_g}{G_f}\right)^{0.9} \left(\frac{\rho_f}{\rho_g}\right)^{0.5} \left(\frac{\mu_g}{\mu_f}\right)^{0.1}$$

پارامتر F در رابطه (41-6) برای جریان جوش هسته‌ای اشباع بکار می‌رود. برای جوش مادون سرد این ضریب بصورت زیر اصلاح می‌شود.

$$\begin{cases} F' = F - 0.2(T_{sat} - T_f) \times (F - 1), & 0 < T_{sat} - T_f \leq 5 \\ F' = 1, & 5 < T_{sat} - T_f \end{cases} \quad (42-6)$$

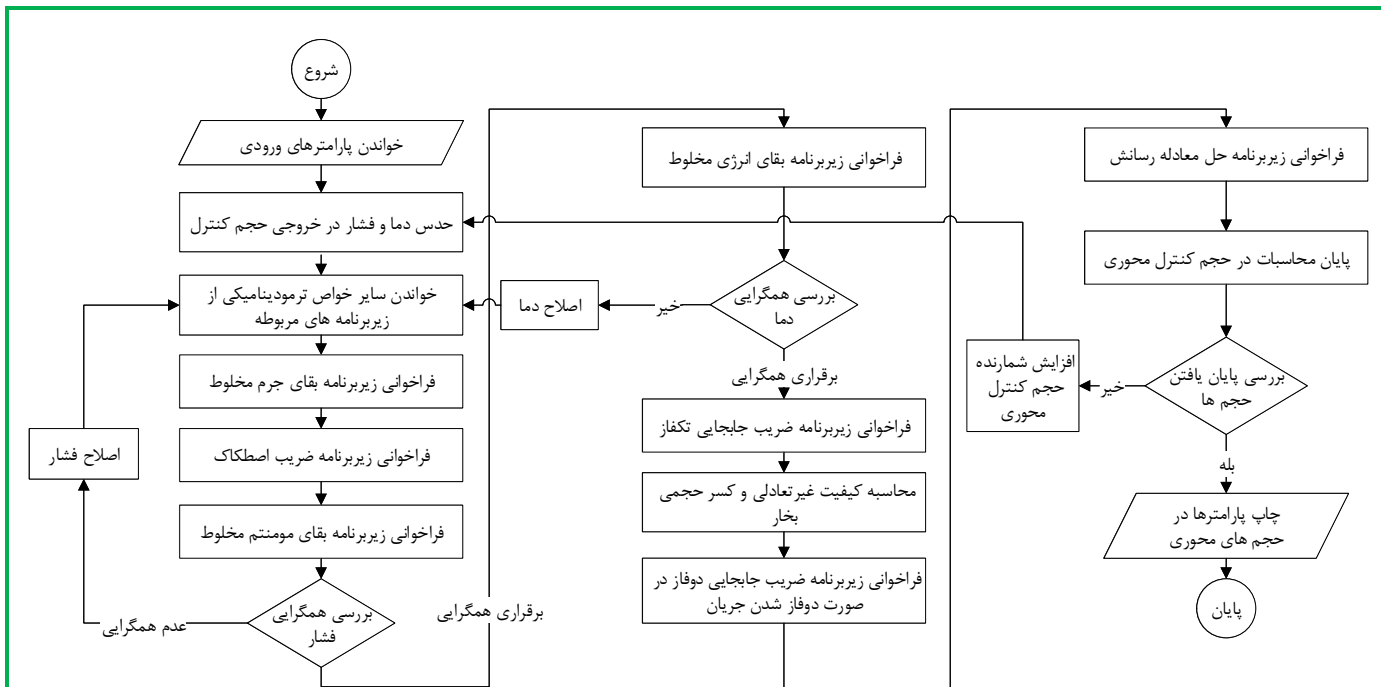
در این رابطه،  $T_{sat}$  دمای اشباع و  $T_f$  دمای سیال است.

### ۶-۱-۵- شار حرارتی بحرانی

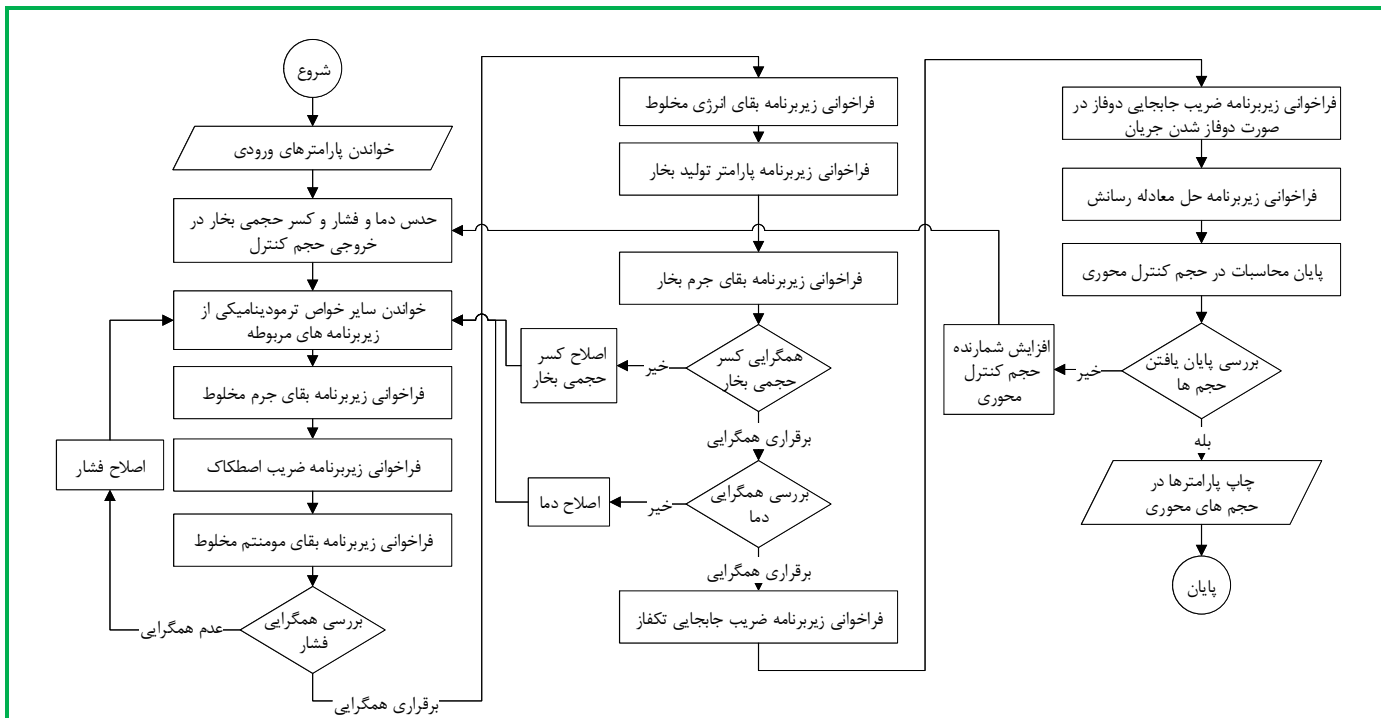
یکی از پارامترهایی که متأثر از شرایط سازه حرارتی و سیال است، شار حرارتی بحرانی می‌باشد. ایجاد شرایطی در مرز سیال و دیواره سازه حرارتی که باعث کاهش شدید ضریب انتقال حرارت جابجایی و به دنبال آن افزایش دمای سطح دیواره شود را شار حرارتی بحرانی می‌گویند. این شرایط می‌تواند در هر یک از رژیم‌های جریان دوفاز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

### ۶-۱-۶- روندنمای مدل کانال

روندنمای برنامه کانال در حالت پایا با مدل همگن در شکل ۲ و مدل شار رانشی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲: روندنمای حل برنامه کانال با مدل دوفاز همگن



شکل ۳: روندنمای حل برنامه کانال با مدل دوفاز شار رانشی

**۶-۲- مدل تک حجم**

تک حجم کوچکترین جزء پایه‌ی مدار ترموهیدرولیکی است. یک کانال می‌تواند بصورت یک سری تک حجم متصل به هم در نظر گرفته شود. به عبارت دیگر تک حجم، کانالی با یک المان حجمی است. یک انشعاب از یک تک حجم با چندین اتصال تشکیل می‌شود. بخش هیدرودینامیکی توربین، جداکننده و پمپ یک تک حجم است. این جزء می‌تواند بصورت مستقل نیز بکار رود که معمولاً به منظور مدل کردن اجزای با اهمیت کمتر در داخل مدار بکار می‌رود. معمولاً در تک حجم از سازه حرارتی استفاده نمی‌شود و تنها محاسبات هیدرودینامیکی صورت می‌گیرد. در مدل تک حجم از مدل کانال با یک حجم محوری بدون سازه حرارتی در نظر گرفته شده است.

روابط و معادلات بکار رفته در مدل تک حجم شامل معادلات بقای جرم، مومنتوم و انرژی و روابط کمکی محاسبه ضریب اصطکاک است. این روابط و معادلات مشابه روابط و معادلات بکار رفته در مدل کانال هستند.

## ۶-۳- مدل اتصال

مدل اتصال به منظور اتصال اجزای مختلف مدار ترموهیدرولیکی استفاده می‌شود. یک اتصال هم برای متصل کردن اجزای مختلف مدار و هم برای مدل کردن تغییر مقطع جریان به کار می‌رود. بنابراین برنامه کامپیوتری مدل اتصال شامل دو بخش است. بخش اول شامل نحوه برقراری ارتباط بین حجم‌های مبدأ و مقصد متصل شده توسط اتصال و بخش دوم شامل محاسبه فشار و سرعت در ورودی حجم مقصد با توجه به نوع اتصال، شرایط سیال در خروجی حجم مبدأ و ضریب افت فشار می‌باشد. در این فعالیت اتصال‌های مختلفی تحت عنوان تک اتصال مدلسازی شده‌اند. این اتصالات شامل اتصال ساده، شیرهای فلکه، دریچه‌ای، یک طرفه و زاویه‌ای، اتصالات زاویه‌دار ۴۵، ۹۰ و ۱۸۰ درجه، زانویی، اتصالات با تغییر ناگهانی مقطع (انبساط و انقباض مسیر)، اتصالات با تغییر ملایم مقطع (انقباض و انبساط مسیر) و ورودی‌های ملایم گرد شده، زاویه‌دار و تیز متداخل است. هر یک از این اتصالات، ضرایب افت فشار موضعی وابسته به ابعاد هندسی دارند که در برنامه تعریف شده‌اند. در صورتیکه اتصال مورد نظر در این مدل لحاظ نشده است، کاربر می‌تواند ضریب افت را به دلخواه وارد کند. این گزینه برای اتصال‌های دیگر که در این مدل لحاظ نشده‌اند، قابل استفاده است.



۶-۳-۱- ضریب افت فشار

از آنجا که مدل جریان در اتصالات و شیرها پیچیده است، در این زمینه تئوری قوی وجود ندارد و افت‌ها معمولاً بصورت تجربی بدست آمده و به پارامترهای جریان لوله ارتباط داده می‌شوند. این داده‌ها، بخصوص برای شیرها، ممکن است وابسته به طراحی سازنده باشند. لذا مقادیر ارائه شده در اینجا می‌تواند بصورت میانگین در نظر گرفته شود [۷].

مقدار اندازه گیری شده افت معمولاً بصورت نسبت افت هد جریان عبوری از جزء به هد سرعت در مدار تعریف می‌شود [۷].

$$K = \frac{h_m}{V^2/2g} = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (۶-۴۳)$$

در این رابطه،  $K$  ضریب افت،  $h_m$  هد جریان،  $V$  سرعت،  $g$  شتاب جاذبه،  $\Delta p$  اختلاف فشار دو سر مقطع و  $\rho$  چگالی سیال است. متأسفانه در روابط ارتباطی بین ضریب افت  $K$  و عدد بی بعد رینولدز و نسبت زبری سطح ارائه نشده است. روش دیگر ارائه ضریب افت فشار مقاطع بصورت طول معادل لوله با استفاده از رابطه ضریب اصطکاک داریسی است. در این رابطه طولی از لوله که افتی معادل اتصال مورد نظر دارد با توجه به ضریب افت بدست می‌آید.

$$h_m = f \frac{L_{eq}}{d} \frac{V^2}{2g} = K \frac{V^2}{2g},$$

$$L_{eq} = \frac{Kd}{f}$$
(۴۴-۶)

در این رابطه،  $f$  ضریب اصطکاک دارسی،  $L_{eq}$  طول معادل اتصال و  $d$  قطر لوله است. سایر پارامترها در رابطه قبل معرفی شده‌اند.

۶-۳-۲- اجزای مختلف تک اتصال

۶-۳-۱- اتصال ساده

در اتصال ساده دو جزء از مدار بدون تغییر مقطع جریان به یکدیگر متصل می‌شوند و کاربر می‌تواند ضریب افت فشار اتصال را به دلخواه تعیین کند.

## ۶-۳-۲- شیرها

شیرها اتصالات مرسوم کنترل و تنظیم جریان سیال می‌باشند و در هر مدار ترموهیدرلیکی بکار می‌روند. شیرها انواع گوناگونی دارند. برخی از انواع شیرها که ضرایب افت آنها در دسترس بود در برنامه لحاظ شده‌اند. برای هر شیر دو نوع اتصال پیچی<sup>۶</sup> و لبه دار<sup>۷</sup> در نظر گرفته شده است. پارامتر تعیین کننده در بدست آوردن ضریب افت فشار در این اتصالات قطر لوله ورودی است. این شیرها عبارتند از:

## - شیر فلکه

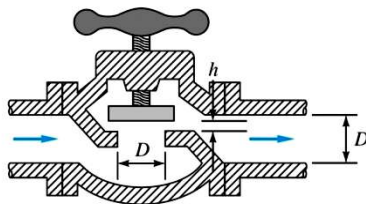
شیر فلکه<sup>۸</sup> برای تنظیم دبی جریان عبوری استفاده می‌شود. ضریب افت این شیر با فرض اینکه شیر کاملاً باز است در نظر گرفته شده است. نمایی از یک شیر فلکه در شکل ۴ نشان داده شده است.

---

6 - Screwed

7 - Flanged

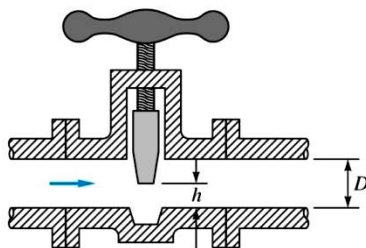
8 - Globe valve



شکل ۴: نمای برش طولی از یک شیر فلکه

- شیر دریچه‌ای

شیر دریچه‌ای<sup>۹</sup> برای قطع سریع و کامل جریان در مدار استفاده می‌شود. برای این شیر ضریب افت تنها برای حالت کاملاً باز لحاظ شده است. نمایی از یک شیر دریچه‌ای در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵: نمای برش طولی از یک شیر دریچه‌ای

- شیر یک طرفه

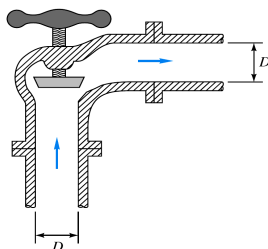
شیر یک طرفه<sup>۱۰</sup> برای ممانعت از برگشت جریان در مدارها استفاده می‌شود. این شیر زمانی که جریان سیال همسو باشد باز و زمانی که غیر همسو باشد بسته است. نمایی از یک شیر یک طرفه در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶: نمای برش طولی از یک شیر یک طرفه

- شیر زاویه‌ای

شیر زاویه‌ای<sup>۱۱</sup> ترکیبی از یک شیر فلکه و یک زانویی است. به عبارت دیگر با استفاده از این شیر هم می‌توان دبی جریان سیال را کنترل کرد و هم جهت جریان را ۹۰ درجه تغییر داد. نمایی از یک شیر دریچه‌ای در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷: نمای برش طولی از یک شیر زاویه‌ای

### ۶-۳-۳- اتصالات زاویه‌دار

اتصالات زاویه‌دار شامل زانویی ۴۵ درجه، ۹۰ درجه و ۱۸۰ درجه است. هر یک از این اتصالات دارای دو نوع شعاع کوچک و شعاع بلند است. همچنین دو نوع اتصال پیچی<sup>۱۲</sup> و لبه دار<sup>۱۳</sup> برای این زانویی‌ها در نظر گرفته شده است. پارامتر تعیین کننده در بدست آوردن ضریب افت فشار در این اتصالات قطر اتصالات است. در جدول شماره ۱ ضرایب افت فشار برای قطرهای مختلف و اتصالات مختلف ارائه شده است.

12 - Screwed

13 - Flanged

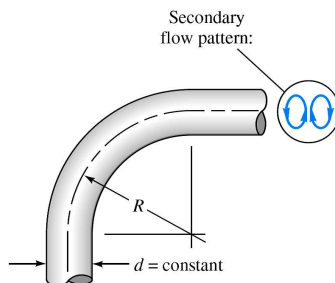
جدول شماره ۱: ضریب افت فشار برای برخی شیرها و اتصالات زاویه‌دار [۷]

	Screwed				Flanged				
	1/2	1	2	4	1	2	4	8	20
	Valves (fully open):	pressure drop coefficient							
Globe	14	8.2	6.9	5.7	13	8.5	6.0	5.8	5.5
Gate	0.30	0.24	0.16	0.11	0.80	0.35	0.16	0.07	0.03
Angle	9.0	4.7	2.0	1.0	4.5	2.4	2.0	2.0	2.0
Elbows:	pressure drop coefficient								
45° regular	0.39	0.32	0.30	0.29	-	-	-	-	-
45° long radius	-	-	-	-	0.21	0.20	0.19	0.16	0.14
90° regular	2.0	1.5	0.95	0.64	0.50	0.39	0.30	0.26	0.21
90° long radius	1.0	0.72	0.41	0.23	0.40	0.30	0.19	0.15	0.10
180° regular	2.0	1.5	0.95	0.64	0.41	0.35	0.30	0.25	0.20
180° long radius	-	-	-	-	0.40	0.30	0.21	0.15	0.10

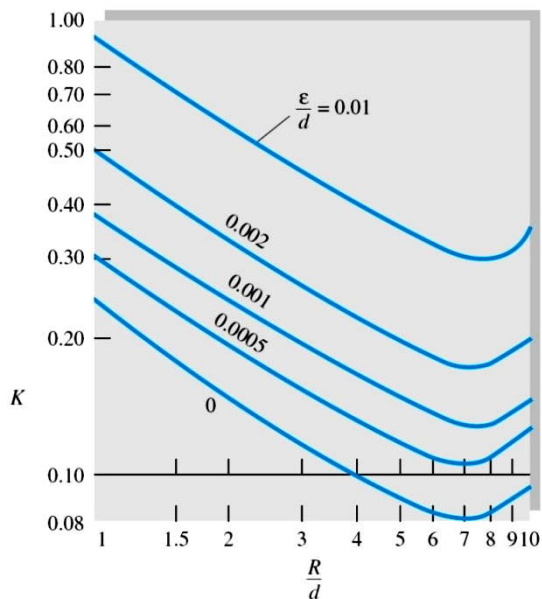


## ۶-۳-۱- زانویی

برای تعیین ضریب افت فشار دقیق‌تر در زانویی به دو پارامتر نسبت شعاع انحنای زانویی به قطر لوله و نسبت زبری به قطر لوله نیاز است. در این بخش ضرایب افت فشار برای زانویی‌های ۹۰ درجه با نسب شعاع انحنا به قطر برابر ۱ و بیشتر قابل محاسبه است. در شکل ۸ نمایی از یک زانویی ۹۰ درجه با شعاع انحنای بزرگ نشان داده شده است. در شکل ۹ ضرایب افت فشار بر حسب نسبت‌های شعاع انحنا و زبری زانویی نشان داده شده است. لازم به ذکر است علاوه بر افت فشار زانویی، افت فشار اصطکاکی ناشی از طول زانویی باید بصورت مجزا محاسبه شده و با افت فشار زانویی جمع شود.



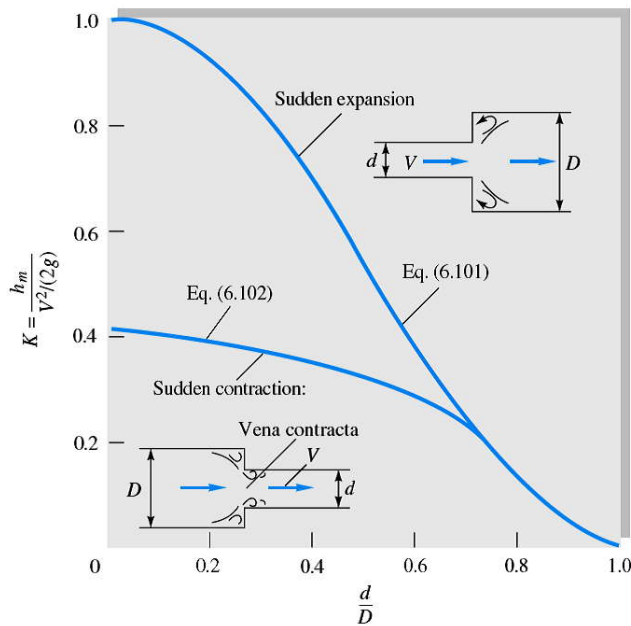
شکل ۸: نمایی از زانویی ۹۰ درجه با شعاع انحنای بزرگ



شکل ۹: تغییرات ضریب افت فشار در زانویی با شعاع انحنای بزرگ

## ۶-۳-۲- تغییر مقطع ناگهانی

یکی از اتصالات متداول در اجزای مختلف مدار، اتصال اجزای با سطوح مقطع یا قطر متفاوت است. نحوه اتصال دو جزء با قطر متفاوت در تعیین افت فشار بسیار تعیین کننده است. این اتصال می‌تواند شامل تغییر مقطع ناگهانی یا تدریجی (ملایم) باشد. در صورتی که تغییر مقطع جریان ناگهانی رخ دهد، افت بیشتری در مسیر جریان سیال ایجاد می‌گردد. تغییر مقطع دو حالت دارد. کاهش سطح مقطع جریان (انقباض) و افزایش سطح مقطع جریان (انبساط). میزان افت فشار ناشی از تغییر مقطع علاوه بر نوع تغییر مقطع، به نسبت قطرهای سطح مقطع کوچکتر به سطح مقطع بزرگتر وابسته است. این نسبت همواره کوچکتر یا مساوی ۱ است. در مقادیر کوچک (کوچکتر از ۰/۷) این نسبت، ضریب افت انبساط مقطع بیشتر از انقباض مقطع است. برای مقادیر بزرگتر از ۰/۷، ضریب افت دو حالت انقباض و انبساط یکسان است. این تغییرات را می‌توان در شکل ۱۰ مشاهده کرد.



شکل ۱۰: تغییرات ضریب افت فشار برای انقباض و انبساط ناگهانی جریان بر حسب نسبت قطرها

## ۶-۳-۳- تغییر مقطع ملایم

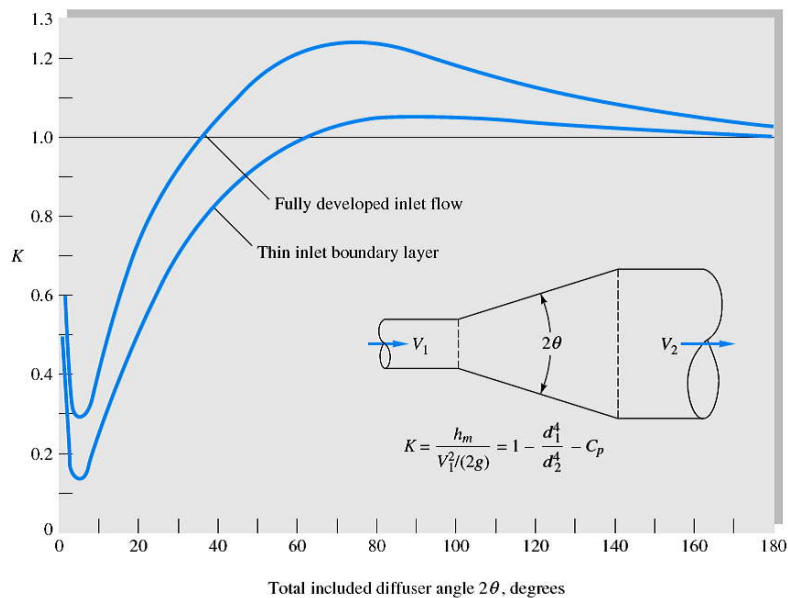
در صورتیکه تغییر مقطع جریان ملایم و تدریجی باشد، ضریب افت کاملاً متفاوت است. شکل ۱۱ ضریب افت فشار جریان در عبور از یک دیفیوزر مخروطی (گذرگاه انبساطی با تغییر تدریجی مقطع جریان) را نشان می‌دهد. در این شکل وابستگی به لایه مرزی در بالا دست جریان نشان داده شده است. لایه مرزی ورودی نازک افت کمتری نسبت به جریان کاملاً توسعه یافته در ورودی ایجاد می‌کند. در انبساط جریان بدلیل افزایش سطح مقطع و کاهش سرعت، فشار استاتیکی افزایش می‌یابد. از سوی دیگر بدلیل تغییر مقطع و افت فشار، مقداری از فشار خروجی کاسته می‌شود. در صورتیکه افزایش فشار ناشی از افزایش سطح مقطع بیشتر از کاهش فشار ناشی از افت باشد، دیفیوزر وظیفه اصلی خود را به درستی انجام می‌دهد. در غیر این صورت استفاده از دیفیوزر معقول نیست. ضریب بازیاب دیفیوزر بصورت زیر تعریف می‌شود.

$$C_p = \frac{P_2 - P_1}{\frac{1}{2} \rho V_1^2} \quad (۴۵-۶)$$

در این رابطه،  $C_p$  ضریب بازیاب دیفیوزر،  $p_1$  و  $p_2$  فشار خروجی و ورودی اتصال،  $\rho$  چگالی و  $V_1$  سرعت در ورودی است. این ضریب نشان دهنده تبدیل فشار دینامیکی به فشار استاتیکی است. هرچه مقدار این ضریب بیشتر باشد، دیفیوزر قابلیت تبدیل فشار دینامیکی به فشار استاتیکی بیشتری خواهد داشت. ارتباط ضریب بازیاب و ضریب افت بصورت زیر است:

$$K = 1 - \frac{d_1^4}{d_2^4} - C_p \quad (۴۶-۶)$$

در این رابطه  $d_1$  قطر ورودی و  $d_2$  قطر خروجی است. طبق این رابطه، در نسبت قطرهای ثابت، هرچه ضریب بازیاب بیشتر باشد، ضریب افت فشار کمتر می‌شود. با توجه به شکل ۱۱ حداقل افت در (حداکثر بازیاب) در زاویه‌ی ۵ درجه حاصل می‌شود. در زاویه کمتر از این مقدار، بدلیل افزایش طول دیفیوزر افت اصطکاکی (مودی) افزایش می‌یابد. برای زاویه‌ی بزرگتر از ۴۰ تا ۶۰ درجه، افت به حدی شدید است که استفاده از انبساط ناگهانی جریان مناسب‌تر است. این افزایش ناشی از جدایش شدید جریان در دیفیوزر با زاویه‌ی بزرگ است.



شکل ۱۱: تغییرات ضریب افت در دیفیوزر بر حسب زاویه مخروطی

در تغییر مقطع ملایم انقباضی بدلیل عدم وقوع جدایش جریان و کمتر بودن اغتشاش، ضریب افت بسیار کوچک است. در جدول شماره ۲ نمونه‌ای از ضرایب افت برای انقباض ملایم جریان نشان داده شده است.

جدول شماره ۲: نمونه ضریب افت فشار در مقطع انقباض جریان ملایم [۷]

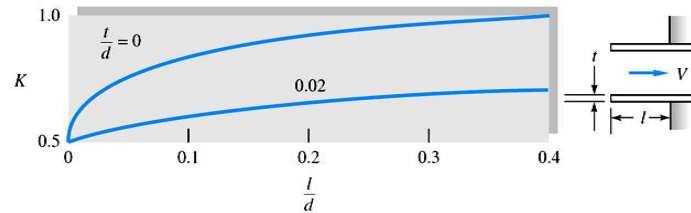
K for gradual contraction	Contraction cone angle, deg
0.02	30
0.04	45
0.07	60

۶-۳-۳-۴- اتصالات خروجی با تغییر مقطع بزرگ

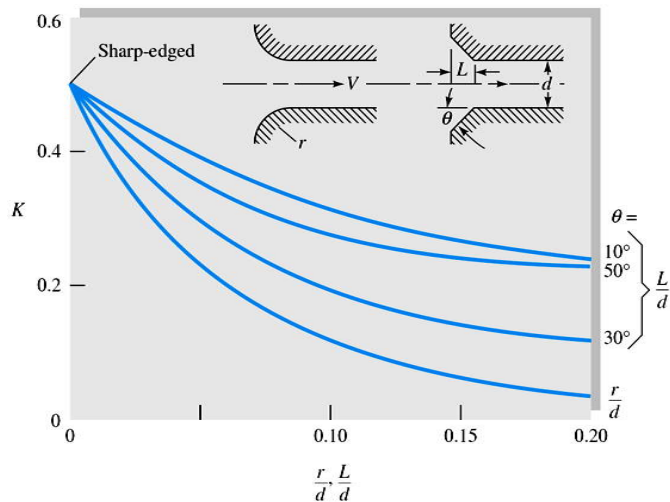
زمانی که نسبت سطوح اتصال بسیار بزرگ باشد، به طوریکه بتوان سطح بزرگ نسبت به سطح کوچک را بی‌نهایت گرفت، ضریب افت فشار مستقل از سطح مقطع بزرگ بوده و به شرایط خروجی وابسته است. در این کد سه نوع اتصال خروجی با تغییر مقطع بزرگ در نظر گرفته شده است: تغییر مقطع با لبه تیز متداخل، لبه گرد شده و لبه زاویه‌دار. در شکل ۱۲ و شکل ۱۳ انواع اتصالات با تغییر مقطع بزرگ نشان داده شده است. در این دو شکل ضریب افت برای هر نوع اتصال نیز بر حسب پارامترهای تعیین کننده لبه اتصال ارائه شده است.



- در اتصال نوع لبه متداخل، نسبت طول به قطر لوله متصل شده و نسبت ضخامت لوله به قطر آن، پارامترهای مهم در تعیین ضریب افت فشار هستند.
- در اتصال نوع لبه گرد شده، نسبت شعاع انحنای محل اتصال به قطر لوله متصل شده پارامتر مهم در تعیین ضریب افت فشار است.
- در اتصال نوع لبه زاویه دار، نسبت طول بخش ورودی به قطر لوله متصل شده و زاویه لبه دو پارامتر مهم در تعیین ضریب افت فشار هستند.



شکل ۱۲: خروجی با لبه متداخل و ضریب افت فشار برحسب طول بخش متداخل به قطر



شکل ۱۳: خروجی با لبه زاویه‌دار و لبه گرد شده و ضریب افت فشار

### ۶-۴- مدل پمپ

مدلسازی پمپ با استفاده از منحنی‌های مشخصه‌ی هد و گشتاور آن، انجام می‌پذیرد. این منحنی‌ها که توسط کارخانه سازنده پمپ ارائه می‌شود، بصورت داده‌های متشابه هد و گشتاور در حالت سیال تکفاز و اختلاف دوفاز در ورودی پمپ تعیین می‌شوند. مدل هیدرودینامیکی پمپ شامل یک حجم کنترل و دو اتصال وابسته به آن می‌باشد. مقادیر هد، گشتاور و سرعت دورانی پمپ با استفاده از جریان سیال ورودی و سرعت پمپ به دست می‌آیند. با در نظر گرفتن ترم هد، مدل هیدرودینامیکی برای حجم پمپ و اتصالات، مشابه یک حجم و اتصال معمولی خواهد بود.

برهم‌کنش بین سیال و پمپ توسط منحنی‌های تجربی توسعه یافته که هد و گشتاور را به جریان حجمی و سرعت دورانی پمپ مرتبط می‌کند، تحلیل می‌شود. منحنی مشخصات<sup>۱۴</sup> پمپ توسط شرکت سازنده آن در منحنی‌های چهار ناحیه‌ای مرجع داده شده است. برای استفاده در کد RELAP5 و کد LOOP-I منحنی چهار ناحیه‌ای باید به فرم فشرده‌تری تبدیل شود که به این فرم‌ها منحنی داده‌های

14 - Characteristic Curve

متشابه<sup>۱۵</sup> گفته می‌شود. این منحنی‌ها با بی‌بعد سازی مقادیر واقعی هد، گشتاور، جریان حجمی و سرعت دورانی نسبت به مقادیر مجاز<sup>۱۶</sup>، به دست می‌آیند. مقادیر مجاز ورودی پمپ مقادیری برای دستیابی به حداکثر بازده مورد نیاز پمپ هستند. منحنی مشخصات برای هد و گشتاور پمپ برای عملکرد سیال تکفاز و اختلاف هد و گشتاور دوفاز به طور جداگانه وارد می‌شوند. داده‌های هد پمپ عمدتاً در معادله مومنتم استفاده می‌شوند. داده‌های گشتاور همچنین می‌توانند در مدلسازی رفتار موتور پمپ در مسائلی که منجر به توقف پمپ (توقفی که در اثر خاموشی پمپ رخ می‌دهد) می‌شود، استفاده شوند.

علامت‌های قراردادی برای مقادیر پارامترهای مختلف پمپ بدین صورت است که عملکرد پمپ در شرایط نرمال با علامت مثبت سرعت دورانی است. در صورتی که جریان حجمی در همان جهت مختصات حجم پمپ باشد، مثبت است. هد در صورت شتاب دادن به سیال در جهت مختصات حجم پمپ مثبت و گشتاور در صورتی که توسط پمپ به سیال وارد شود، منفی است چراکه تمایل به کاهش شتاب پمپ دارد. در جریان نرمال پمپ و در حالت پایا این گشتاور منفی است و توسط گشتاور مثبت اعمال شده توسط موتور پمپ به تعادل می‌رسد.

---

15 - Homologous Curve

16 - Rated values

## ۶-۴-۱- معرفی داده‌های متشابه پمپ

در این بخش توضیح مختصری درباره روند استفاده صحیح از داده‌های متشابه ارائه می‌شود. پارامترهای متشابه، توسط آنالیز ابعادی با شبیه سازی شرایط برای پمپ، به دست می‌آیند. سه پارامتر مستقل که توسط تئوری پی باکینگهام<sup>۱۷</sup> بدست می‌آیند عبارتند از [۳]:

$$\pi_1 = \frac{Q}{vD} \quad (۴۷-۶)$$

$$\pi_2 = \frac{NQ^{\frac{1}{2}}}{(gH)^{\frac{3}{4}}} \quad (۴۸-۶)$$

$$\pi_3 = \frac{Q}{ND^3} \quad (۴۹-۶)$$

در این روابط  $N$  سرعت دورانی بر حسب  $\text{rpm}$ ،  $Q$  جریان حجمی بر حسب  $\text{gpm}$ ،  $H$  هد بر حسب  $\text{ft}$ ،  $g$  شتاب گرانش بر حسب  $\frac{\text{ft}}{\text{hr}^2}$ ،  $v$  لزجت سینماتیکی و  $D$  قطر پروانه پمپ بر حسب  $\text{ft}$  می‌باشد. چهارمین پارامتر از ترکیب پارامترهای  $\pi_2$  و  $\pi_3$  به دست می‌آید [۳].

$$\pi_4 = \frac{gH}{N^2 D^2} \quad (۵-۶)$$

پارامتر  $\pi_1$  همانند عدد رینولدز بوده و تنها پارامتری است که در آن لزجت سینماتیکی سیال در نظر گرفته می‌شود. تجربه طراحی و سنجش پمپ نشان‌دهنده تأثیر ناچیز اثرات ویسکوزیته است. این اثرات توسط اصطکاک دیواره به وجود می‌آید. بخصوص در موارد جریان رینولدز بالا این تأثیر کمتر است، به همین دلیل عملاً عدد بی‌بعد  $\pi_1$  کاربردی نخواهد داشت.

از پارامترهای  $\pi_2$ ،  $\pi_3$  و  $\pi_4$  برای بدست آوردن کارایی پمپ استفاده می‌شود. پارامتر  $\pi_2$  سرعت مخصوص نامیده شده و معمولاً به عنوان پارامتری جداگانه برای مشخص کردن بهترین نوع پروانه پمپ برای کاربردهای ویژه بکار می‌رود. در عمل شتاب گرانش  $g$  نادیده گرفته شده و سرعت ویژه به شکل زیر ساده می‌شود [۳].

$$N_s = \frac{NQ^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{3}{4}}} \quad (۵۱-۶)$$

در این رابطه  $N_s$  بی‌بعد نیست.

دو پارامتر عملکردی که برای مدل کردن پمپ استفاده می‌شوند، جریان حجمی ویژه بی‌بعد و هد ویژه می‌باشند [۳].

$$Q_s = \frac{Q}{ND^3} \quad (۵۲-۶)$$

$$H_s = \frac{H}{N^2 D^2} \quad (۵۳-۶)$$

زمانی که عملکرد گشتاور هم در نظر گرفته شود، پارامتر بی‌بعد دیگری بصورت گشتاور بی‌بعد تعریف می‌شود [۳].

$$\pi_s = \frac{\tau}{\rho N^2 D^5} \quad (۵۴-۶)$$

$\rho$  چگالی سیال بر حسب  $\frac{lbm}{ft^3}$  و  $\tau$  گشتاور محور پمپ می‌باشد. معمولاً چگالی ثابت در نظر گرفته می‌شود و بنابراین، عدد با بعد گشتاور ویژه به شکل زیر تعریف می‌شود [۳].

$$\pi_s = \frac{\tau}{N^2 D^5} \quad (55-6)$$

پمپ‌های با حالت متشابه پمپ‌هایی هستند که مقادیر ویژه دبی، هد و گشتاور یکسانی دارند. داده‌های عملکرد پمپ معمولاً بصورت نموداری از هد یا گشتاور بصورت تابعی از سرعت پمپ و جریان حجمی نمایش داده می‌شوند.

شکل ۱۴ نمودار چهار ناحیه‌ای هد پمپ‌های MOD1 متشابه را که در مرجع [۱] معرفی شده‌اند، نشان می‌دهد. در این نمودار خطوط هد ثابت برای مقادیر مستقل سرعت و جریان نشان داده شده است. شکل ۱۵ نیز نمودار چهار ناحیه‌ای گشتاور را برای پمپ‌های MOD1 نشان می‌دهد. در نمودار هد تمامی نقاط خطوط هد ثابت در مبدأ دارای ظرفیت ویژه ( $Q_s$ ) یکسانی هستند. با داشتن دبی و سرعت مورد نظر می‌توان با استفاده از این دو نمودار هد و گشتاور پمپ را استخراج نمود. برای راحتی استخراج دو پارامتر هد و گشتاور برای پمپ‌های متشابه این دو نمودار به نمودارهای با پارامترهای متشابه تبدیل می‌شود. جدول شماره ۳ تعریف پارامترهای متشابه را نشان می‌دهد. با محاسبه

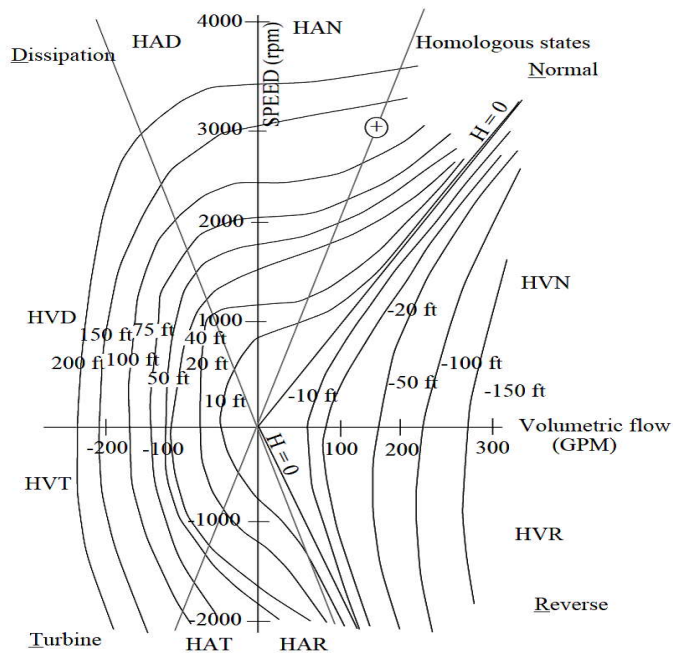


مقادیر  $U$  و  $\alpha$  و محدوده تعریف شده در جدول، می‌توان مقادیر  $h$  و  $\beta$  را بدست آورد. نمودار شکل ۱۴ در دو مرحله به منحنی‌های متشابه تبدیل می‌شود. ابتدا با استفاده از مقادیر مجاز هد  $H_R$ ، گشتاور  $\tau_R$ ، جریان  $Q_R$  و سرعت  $N_R$  مقادیر نمودار به ترتیب با

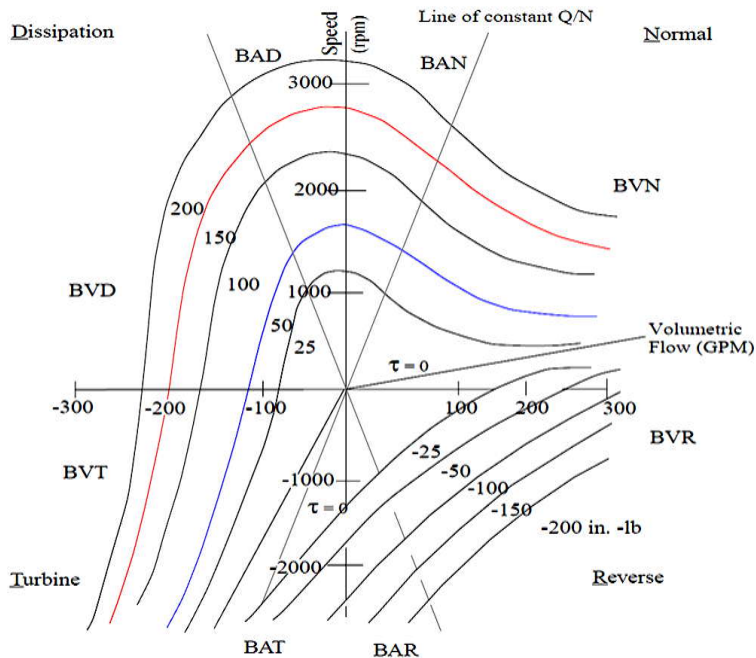
پارامترهای  $\alpha = \frac{N}{N_R}$ ،  $\nu = \frac{Q}{Q_R}$ ،  $\beta = \frac{\tau}{\tau_R}$ ،  $h = \frac{H}{H_R}$  بی‌بعد می‌شوند. سپس داده‌ها بر اساس پارامترهای متشابه  $\frac{\nu}{\alpha}$  یا  $\frac{\alpha}{\nu}$ ،  $\frac{h}{\nu^2}$  یا  $\frac{h}{\alpha^2}$

و  $\frac{\beta}{\alpha^2}$  یا  $\frac{\beta}{\nu^2}$  رسم می‌شوند. استفاده از هر یک از پارامترها وابسته به  $\frac{\nu}{\alpha}$  ابتدایی است. شکل ۱۶ منحنی هد متشابه که از نمودار شکل ۱۴ به دست آمده است را نشان می‌دهد. شکل ۱۷ منحنی گشتاور متشابه که از نمودار شکل ۱۵ بدست آمده است را نشان می‌دهد.

در مدل پمپ زوج مرتبه‌هایی که نمودارهایی همانند نمودارهای شکل ۱۶ و شکل ۱۷ توسط شرکت‌های سازنده پمپ ارائه می‌شود، بعنوان داده‌های ورودی از کاربر گرفته شده و بر اساس میانبایی خطی بین این زوج مرتبه‌ها، هد و گشتاور پمپ در شرایط مسأله تعیین می‌گردد.



شکل ۱۴: منحنی هد چهار ناحیه‌ای برای پمپ‌های MOD1 (ANC-A-2083) [۳]

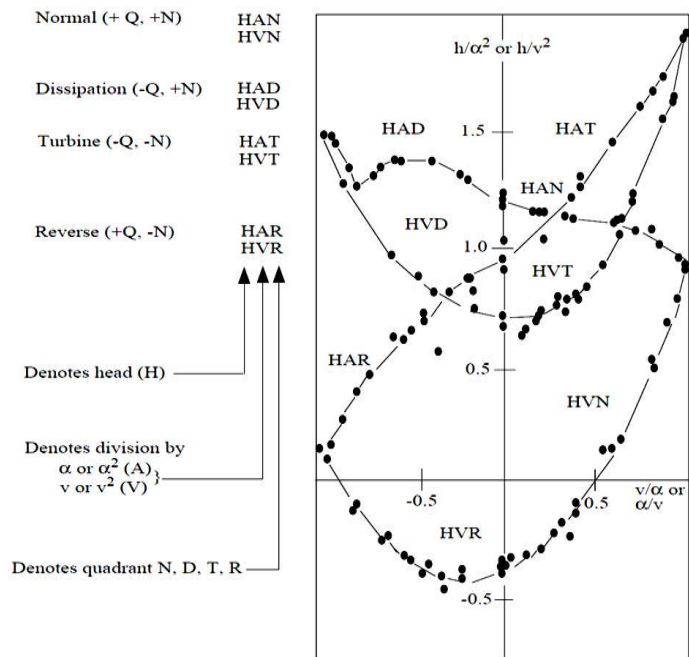


شکل ۱۵: منحنی چهار ناحیه‌ای گشتاور برای پمپ‌های MOD1 (ANC-A-3449) [۳]

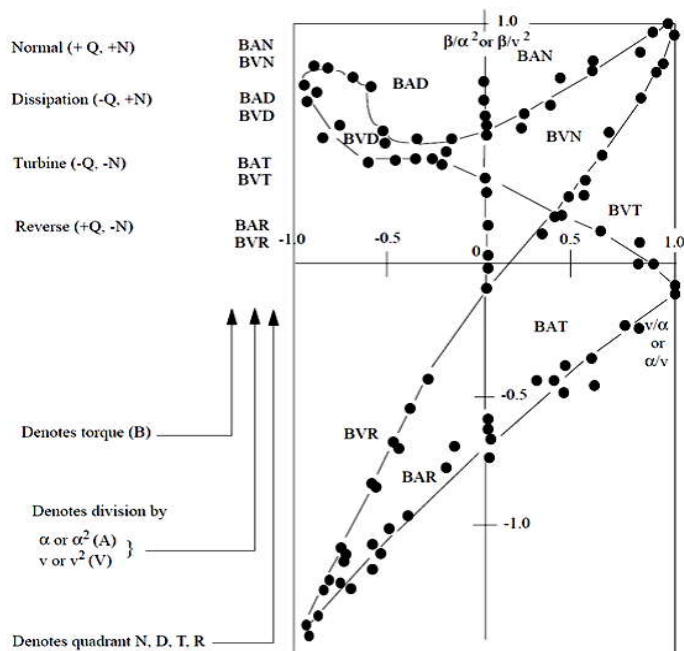
جدول شماره ۳: تعریف پارامترهای منحنی‌های متشابه پمپ

شماره	علامت مشخص کننده نوع جریان	$\alpha$	$v$	$\frac{v}{\alpha}$	پارامتر مستقل	پارامتر وابسته هد	پارامتر وابسته گشتاور
۱	HAN BAN Normal Pump	$> 0$	$\geq 0$	$\leq 1$	$\frac{v}{\alpha}$	$\frac{h}{\alpha^2}$	$\frac{\beta}{\alpha^2}$
۲	HVN BVN Normal Pump	$> 0$	$\geq 0$	$> 1$	$\frac{\alpha}{v}$	$\frac{h}{v^2}$	$\frac{\beta}{v^2}$
۳	HAD BAD Energy dissipation	$> 0$	$< 0$	$\geq -1$	$\frac{v}{\alpha}$	$\frac{h}{\alpha^2}$	$\frac{\beta}{\alpha^2}$
۴	HVD BVD Energy dissipation	$> 0$	$< 0$	$< -1$	$\frac{\alpha}{v}$	$\frac{h}{v^2}$	$\frac{\beta}{v^2}$
۵	HAT BAT Normal Turbine	$\leq 0$	$\leq 0$	$\leq 1$	$\frac{v}{\alpha}$	$\frac{h}{\alpha^2}$	$\frac{\beta}{\alpha^2}$
۶	HVT BVT Normal Turbine	$\leq 0$	$\leq 0$	$> 1$	$\frac{\alpha}{v}$	$\frac{h}{v^2}$	$\frac{\beta}{v^2}$

$\frac{\beta}{\alpha^2}$	$\frac{h}{\alpha^2}$	$\frac{\nu}{\alpha}$	$\geq -1$	$> 0$	$\leq 0$	HAR BAR Reverse Pump	Y
$\frac{\beta}{\nu^2}$	$\frac{h}{\nu^2}$	$\frac{\alpha}{\nu}$	$< -1$	$> 0$	$\leq 0$	HVR BVR Reverse Pump	Λ



شکل ۱۶: منحنی متشابه هد بر اساس پارامترهای بی بعد [۳]



شکل ۱۷: منحنی متشابه گشتاور بر اساس پارامترهای بی بعد [۳]

## ۶-۴-۲- روندنمای مدل پمپ

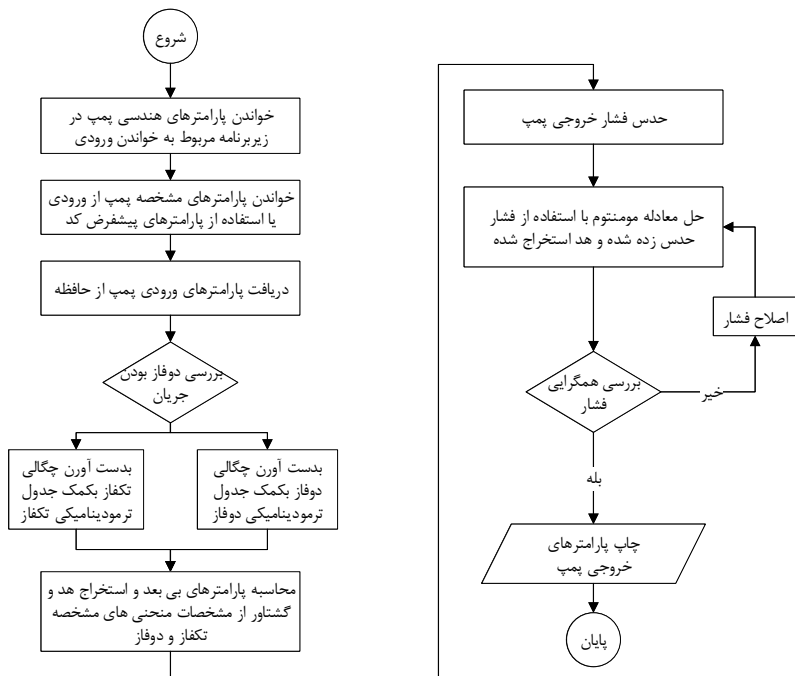
روند محاسبات در مدل پمپ به این صورت است که ابتدا مشخصات پمپ خوانده شده و سپس شرایط اولیه سیال (تکفاز یا دوفاز بودن) بررسی شده و بر مبنای شرایط سیال، خواص ترمودینامیکی سیال ورودی بدست می‌آید. محاسبه مقادیر  $\alpha$ ،  $\beta$ ،  $\nu$  و  $h$  با استفاده از مقادیر مجاز هد، گشتاور، دبی و سرعت و مقادیر اولیه آنها که در ورودی داده شده است، در مرحله بعد انجام شده و در ادامه با استفاده از داده‌های منحنی متشابه تکفاز هد و گشتاور تکفاز محاسبه می‌شود. در حالت دوفاز برای محاسبه هد و گشتاور داده‌های اختلاف هد و گشتاور از نمودار متشابه اختلاف هد و گشتاور بدست می‌آید. سپس بر اساس رابطه (۶-۵۶) و (۶-۵۷) مقدار هد و گشتاور محاسبه می‌شود. مقادیر  $M_H$  و  $M_T$  برای حالت تکفاز برابر صفر می‌باشند.

$$H = H_{1\Phi} + M_H (\alpha_g) \Delta H \quad (۶-۵۶)$$

$$\tau = \tau_{1\Phi} + M_\tau (\alpha_g) \Delta \tau \quad (۶-۵۷)$$

در مرحله بعد معادله مومنتم حل شده و فشار خروجی به دست می‌آید. در شکل ۱۸ روندنمای مدل پمپ نشان داده شده است.





شکل ۱۸: روندنمای مدل پمپ

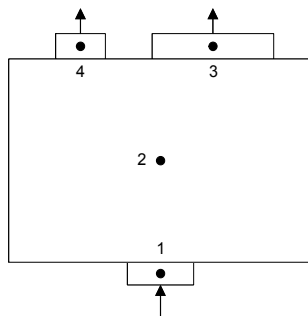
## ۶-۵- مدل انشعاب

انشعاب برای اتصال بین چند جزء هیدرودینامیکی مدار مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک انشعاب از یک تک حجم و چندین اتصال در ورودی و خروجی تشکیل شده است. بخش‌هایی مانند بخش پایینی و بالای قلب، انشعاب هستند. همچنین گذرگاه‌های تقسیم جریان مانند بخش‌هایی که جریان‌های فرعی را به جریان اصلی متصل می‌کنند نیز توسط انشعاب مدل می‌شوند. مسأله مهم در انشعاب تخمین مناسب پارامترهای ترموهیدرولیکی در خروجی انشعاب است. در مدل انشعاب بدلیل وجود بیش از یک خروجی، تعداد مجهولات از تعداد معادلات بیشتر است، بنابراین لازم است قیدی در خروجی اعمال شود. قید مورد نظر برابری فشار در خروجی‌های انشعاب است.

فرضیات بکار رفته بخش انشعاب عبارتند از:

۱. خواص ترمودینامیکی مانند دما، آنتالپی و چگالی سیال در خروجی انشعاب در تمامی خروجی‌ها یکسان در نظر گرفته می‌شوند.
۲. در انشعاب از سازه حرارتی استفاده نمی‌شود و تنها محاسبات هیدرودینامیکی صورت می‌گیرد.

۳. مقدار سرعت در سه موقعیت ورودی، خروجی و وسط انشعاب محاسبه می‌شود. سرعت ورودی برابر سرعت میانگین تمامی ورودی‌های انشعاب است و با توجه به سطح مقطع هر یک از ورودی‌ها محاسبه می‌شود. سرعت خروجی نیز سرعت محاسبه شده توسط مدل تک حجم می‌باشد. سرعت پس از هر خروجی با توجه به روش بکار رفته در تقسیم جریان سیال بدست می‌آید.
۴. دبی سیال عبوری از هر خروجی انشعاب مقداری متفاوت با خروجی دیگر دارد. سرعت سیال نیز، در هر خروجی با خروجی دیگر متفاوت است. بدلیل بیشتر شدن مجهولات از معادلات نمی‌توان مقدار سرعت در خروجی‌های انشعاب را بدست آورد. به عبارت دیگر بر اساس روش بکار رفته، دبی عبوری از انشعاب در خروجی‌ها قابل تقسیم نیست، بنابراین نیاز به فرضیات ساده کننده است.
- در شکل ۱۹ نمایی از یک انشعاب با یک ورودی و دو خروجی نشان داده شده است. در این شکل نقاط ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب مقطع ورودی، میانی و دو مقطع خروجی را نشان می‌دهند.



شکل ۱۹: نمایی از یک انشعاب با یک ورودی و دو خروجی

در این فرض فشار در موقعیت دو نقطه ۳ و ۴ در شکل ۱۹ یکسان فرض می‌شوند. برای توضیح کاربرد این فرض می‌توان قلب راکتور شامل بخش پایینی<sup>۱۸</sup>، کانال‌های قلب<sup>۱۹</sup> و بخش بالایی<sup>۲۰</sup> را در نظر گرفت. در شکل ۲۰ نمایی از این راکتور فرضی نشان داده شده است. بخش

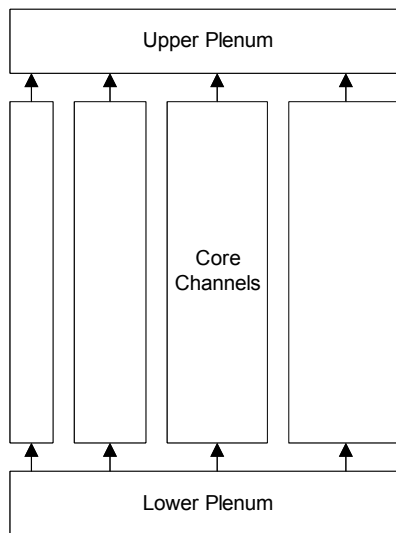
---

18 - Lower Plenum

19 - Core Channels

20 - Upper Plenum

پایینی و بالایی قلب توسط انشعاب در کدهای محاسبات مدار مدل‌سازی می‌شوند. از آنجا که همه کانال‌های قلب راکتور در انشعاب بخش بالایی به یکدیگر می‌رسند، فشار در خروجی‌های کانال‌های قلب راکتور یکسان است.



شکل ۲۰: نمایی از راکتور فرضی با بخش پایینی، کانال‌های قلب و بخش بالایی

در مدل توسعه داده شده در انشعاب برای محاسبه دبی (یا سرعت) در خروجی‌های انشعاب به قیدی نیاز است که ارتباطی بین پارامترهای سیال در خروجی‌های انشعاب ایجاد کند. از سویی در کانال‌های موازی هم ارتفاع، اختلاف فشار دو سر کانال‌ها که عامل محرک جریان سیال است، در کلیه کانال‌ها برابر است. به عبارت دیگر، عامل افت فشار از خروجی انشعاب پایین تا ورودی انشعاب بالا باید در کلیه کانال‌ها برابر باشد. این افت از افت اصطکاکی کانال‌ها و افت ناشی از تغییر مقطع جریان تشکیل می‌شود. در صورتیکه طول کانال‌ها به صفر میل کند، تنها عامل افت ناشی از تغییر مقطع جریان خواهد بود. در این حالت فشار در خروجی‌های انشعاب یکسان در نظر گرفته می‌شود. سرعت در خروجی‌های انشعاب از معادله بقای جرم و قید برابری فشار محاسبه می‌شود و سرعت میانگین کل انشعاب، میانگین خطی سرعت میانگین ورودی و خروجی انشعاب است. مقادیر سایر خواص ترمودینامیکی نیز در سه موقعیت ورودی، خروجی و وسط انشعاب بدست می‌آیند.

#### ۶-۵-۱- محاسبات مدل انشعاب

در مدل انشعاب ابتدا میانگین پارامترهای ورودی مانند دما، فشار و سرعت محاسبه و بعنوان پارامترهای میانگین ورودی به یک تک حجم در نظر گرفته می‌شوند. دمای میانگین ورودی بصورت میانگین وزن دهی شده توسط دبی هر اتصال ورودی بدست می‌آید.

$$\bar{T}_{in} = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{m}_i T_i}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad (58-6)$$

در این رابطه،  $\bar{T}_{in}$  دمای متوسط ورودی انشعاب،  $\dot{m}_i$  دبی هر اتصال ورودی انشعاب و  $T_i$  دما در هر اتصال ورودی انشعاب و  $n$  تعداد اتصالات ورودی انشعاب است.

برای محاسبه دقیق‌تر سرعت میانگین ورودی انشعاب، تغییر مقطع باید لحاظ شود. افت ناشی از تغییر مقطع بر سرعت در آستانه پس از ورودی انشعاب تأثیر گذار است. برای لحاظ این اثر ابتدا سطح مقطع کل انشعاب بر اساس نسبت سطح مقطع هر ورودی به مجموع سطوح مقاطع ورودی به هر ورودی تخصیص داده می‌شود.

$$A_i^B = \frac{A_i A_B}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (59-6)$$

در این رابطه،  $A_B$  سطح مقطع کل انشعاب،  $A_i$  سطح مقطع هر اتصال ورودی انشعاب و  $A_i^B$  سطح مقطع تخصیص داده شده به هر ورودی در آستانه داخل انشعاب است.

حال می‌توان سرعت در آستانه داخل انشعاب مربوط به هر اتصال را از رابطه زیر محاسبه نمود.

$$V_i^B = V_i \frac{A_i}{A_i^B} \quad (۶-۶۰)$$

در این رابطه،  $V_i^B$  سرعت در آستانه داخل انشعاب برای هر ورودی و  $V_i$  سرعت در هر ورودی است.

سرعت میانگین بصورت میانگین سرعت‌ها در آستانه داخل انشعاب بر اساس وزن دهی با سطح مقطع تخصیص داده شده به هر اتصال بدست می‌آید.



$$\bar{V}_{in} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i^B A_i^B}{\sum_{i=1}^n A_i^B} \quad (61-6)$$

از آنجا که تغییر ناگهانی مقطع باعث ایجاد افت در جریان سیال می‌شود، برای محاسبه فشار میانگین ورودی به ضریب افت ناشی از این تغییر مقطع نیاز است. بر این اساس، با کمک نسبت سطح مقطع هر اتصال ورودی به سطح مقطع تخصیص داده شده به هر ورودی و با توجه به اینکه نوع اتصال از نوع تغییر ناگهانی مقطع انبساطی است، ضریب افت از زیربرنامه مربوطه استخراج می‌شود. برای بدست آوردن فشار میانگین ورودی ابتدا باید فشار پس از محل تغییر مقطع جریان را بدست آوریم.

$$P_i^B = P_i - k_{loss} \frac{\rho_i V_i^2}{2} \quad (62-6)$$

در رابطه فوق،  $P_i^B$  فشار در آستانه ورودی هر اتصال پس از تغییر مقطع،  $P_i$  فشار در هر اتصال ورودی،  $k_{loss}$  ضریب افت ناشی از تغییر ناگهانی مقطع (انبساط مقطع)،  $\rho_i$  چگالی در هر اتصال ورودی است.

فشار میانگین ورودی بصورت میانگین خطی فشارهای در آستانه ورودی در نظر گرفته می‌شود.

$$\bar{P}_{in} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i^B}{n} \quad (۶-۶۳)$$

در این رابطه،  $\bar{P}_{in}$  فشار متوسط ورودی انشعاب و  $P_i$  فشار در هر اتصال ورودی انشعاب است.

جریان سیال در هر یک از ورودی‌های انشعاب می‌تواند تکفاز یا دوفاز باشد. برای بدست آوردن شرایط دوفاز یا تکفاز بودن جریان می‌توان کیفیت سیال داخل انشعاب را با میانگین کیفیت‌های ورودی وزن دهی شده با دبی هر ورودی تعیین کرد. اما این روش باعث می‌شود که حالت نادرستی تخمین زده شود. بعنوان مثال در صورتی که دمای میانگین انشعاب از دمای اشباع در فشار میانگین انشعاب کمتر باشد، در واقعیت امکان وجود حباب و کیفیت بالای صفر وجود نخواهد داشت؛ اما با این روش میانگین گیری، در صورتیکه کیفیت در تنها یکی از ورودی‌های اتصال بزرگتر از صفر باشد، کیفیت میانگین اتصال از یک بزرگتر خواهد بود.

برای رفع این مشکل، از دستور شرطی چک کردن دمای متوسط انشعاب و دمای اشباع در فشار متوسط انشعاب استفاده شده است. در صورتی که دمای متوسط انشعاب از دمای اشباع در فشار متوسط انشعاب کوچکتر باشد، کیفیت متوسط انشعاب برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. در غیر این صورت کیفیت متوسط انشعاب بصورت میانگین‌گیری محاسبه می‌شود.

$$\bar{X}_{in} = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{m}_i X_i}{\sum_{i=1}^n \dot{m}_i} \quad (۶-۶۴)$$

پس از متوسط‌گیری پارامترها در ورودی انشعاب، بخش تک حجم انشعاب حل می‌شود و پارامترهای خروجی انشعاب با فراخوانی زیربرنامه کانال با یک حجم فراخوانده می‌شود و پارامترهای خروجی محاسبه می‌شود.

در مرحله آخر پارامترهای خروجی محاسبه شده به اتصالات خروجی تخصیص داده می‌شود. دما و کیفیت همه اتصالات خروجی برابر دما و کیفیت محاسبه شده در خروجی است. اما سرعت و فشار خروجی هر اتصال کمی متفاوت است.

رابطه برنولی برای جریان غیر لزج قابل استفاده است. این رابطه بین دو نقطه ۲ و ۳ در شکل ۱۹ را می‌توان بصورت زیر نوشت.

$$\frac{P_2}{\rho_2 g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 = \frac{P_3}{\rho_3 g} + \frac{V_3^2}{2g} + Z_3 + h_{l3} \quad (۶۵-۶)$$

و بین دو نقطه ۲ و ۴:

$$\frac{P_2}{\rho_2 g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 = \frac{P_4}{\rho_4 g} + \frac{V_4^2}{2g} + Z_4 + h_{l4} \quad (۶۶-۶)$$

پارامترهای روابط فوق عبارتند از:  $P$ : فشار،  $\rho$ : چگالی،  $g$ : شتاب جاذبه،  $V$ : سرعت،  $Z$ : ارتفاع و  $h_l$ : افت هد.

با استفاده از دو رابطه فوق و فرض برابری فشار در دو نقطه ۳ و ۴ خواهیم داشت:

$$\frac{V_3^2}{2g} + h_{l3} = \frac{V_4^2}{2g} + h_{l4} \quad (۶۷-۶)$$

از طرف دیگر با استفاده از رابطه (۶-۴۳)، رابطه سرعت بین دو نقطه بصورت زیر حاصل می‌شود.

$$V_4 = V_3 \sqrt{\frac{1 + k_{loss_3}}{1 + k_{loss_4}}} \quad (68-6)$$

در این رابطه،  $K_{loss}$  ضریب افت بکار رفته در مدل اتصال است. این افت در اتصال‌های خروجی بدلیل تغییر ناگهانی مقطع ناشی از انقباض جریان بوجود می‌آید.

قید دیگر برای محاسبه سرعت در هر خروجی انشعاب، پیوستگی سیال است:

$$V_B^{out} A_B = \sum_{i=1}^n V_i^{out} A_i^{out} \quad (69-6)$$

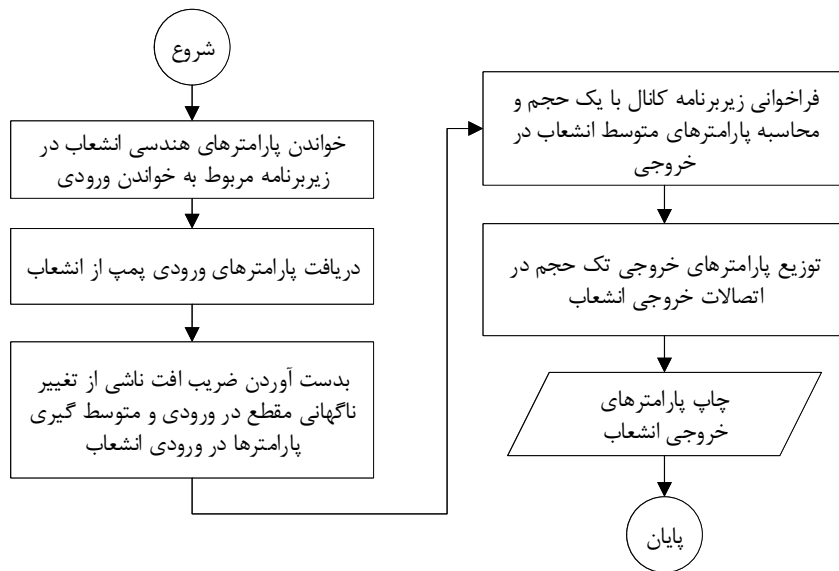
در این رابطه،  $V_B^{out}$  سرعت خروجی محاسبه شده توسط مدل تک حجم،  $A_B$  سطح مقطع انشعاب،  $V_i^{out}$  سرعت در هر خروجی انشعاب و  $A_i^{out}$  سطح مقطع هر اتصال خروجی انشعاب است. با استفاده از دو رابطه (68-6) و (69-6) سرعت در هر اتصال خروجی انشعاب محاسبه می‌گردد.

ضریب افت ناشی از انقباض جریان برای محاسبه فشار در هر اتصال خروجی انشعاب نیز استفاده می‌شود.

$$P_i^{out} = P_B^{out} - k_{loss_i} \frac{\rho_B^{out} (V_B^{out})^2}{2} \quad (۷۰-۶)$$

۶-۵-۲- روندنمای مدل انشعاب

محاسبات مدل انشعاب شامل سه بخش است. بخش میانگین‌گیری پارامترهای ورودی و تعیین پارامتر متوسط ورودی، بخش محاسبات تک حجم و بخش توزیع پارامترهای خروجی مدل تک حجم در اتصالات خروجی انشعاب. این سه بخش در روندنمای مدل انشعاب در شکل ۲۱ نشان داده شده است.



شکل ۲۱: روندنمای مدل انشعاب

## ۶-۶- مدل مولد بخار

مولد بخار از اجزای اصلی یک نیروگاه هسته‌ای راکتور آب تحت فشار است. مولد بخار با برداشت حرارت از سیال مدار اولیه (خنک کننده راکتور) در دسته لوله‌ها در بخش پوسته (ثانویه) بخار تولید می‌کند. جریان سیال در بخش اولیه مایع تکفاز مادون سرد است که از درون لوله‌های افقی عبور می‌کند، اما در بخش ثانویه جریان سیال از مایع به فاز اشباع تغییر حالت داده و پس از جداسازی قطرات مایع و خروج از مولد بخار وارد توربین می‌شود. حجم بندی یک مولد بخار، شامل کانال‌های افقی مدل کننده بخش اولیه و کانال‌های عمودی مدل کننده بخش ثانویه است. هر کانال افقی بخش اولیه به یک کانال عمودی بخش ثانویه متصل است و بین آن دو تبادل حرارت انجام می‌شود. برای مدل‌سازی جریان دوفاز در بخش پوسته، از مدل همگن تعادلی و فرض‌های ساده کننده‌ای همانند جریان یک بعدی در بخش پوسته و عدم انحراف از جوشش حبابی استفاده شده است. در برنامه ارائه شده معادلات بقای جرم، انرژی و مومنتم در بخش اولیه و ضریب جابجایی حرارتی دو فاز در بخش ثانویه برای به دست آوردن شرایط سیال در خروجی هر حجم در هر بخش حل می‌شوند.

۶-۶-۱- فرضیات مدل‌سازی مبدل حرارتی پوسته و لوله

- چیدمان دسته لوله‌ها مطابق چیدمان واقعی آنها در نظر گرفته شده است.



- توزیع سیال در دو بخش پوسته و لوله به طور یکنواخت انجام می‌گیرد.
- روش حل مسئله برای محاسبه انتقال حرارت بین بخش لوله و پوسته روش P-NTU می‌باشد.
- داده‌های مدل مولد بخار واقعی در نظر گرفته شده برای حل مسئله داده‌های مولد بخار نیروگاه هسته‌ای بوشهر می‌باشند.
- دسته لوله‌ها از داخل و خارج کاملاً تمیز بوده و فاقد هرگونه رسوب می‌باشند.
- جریان داخل لوله‌ها بصورت یک بعدی و در راستای جریان در نظر گرفته می‌شود.
- تغییر خواص ترمودینامیکی در هر حجم کنترل بصورت خطی می‌باشد.
- جوشش سیال در مولد بخار بصورت جریانی حبابی در نظر گرفته می‌شود. در حالت واقعی در یک مولد بخار دسته لوله‌ها در بخش پوسته بصورت کامل شناور بوده و بخار تولید شده از پایین تا بالا افزایش یافته و در بالای دسته لوله‌ها جداسازی می‌شود. به عبارت دیگر، فرض می‌شود رژیم جریان دوفاز از رژیم جریان حبابی فراتر نمی‌رود و مدل جریان همگن برای این کار مناسب است.

## ۶-۶-۲- مدل سازی بخش اولیه (لوله)

مدل سازی جریان در بخش اولیه به روش تفاضل محدود انجام شده است. بدین منظور معادلات بقای جرم، مومنتم و انرژی مشابه مدل کانال حل شده است. این معادلات پس از گسسته سازی به شکل زیر نوشته می‌شوند.

معادله جرم برای بدست آوردن سرعت سیال خروجی هر حجم

$$\rho_i v_i = \rho_o v_o \Rightarrow v_o = \frac{\rho_i v_i}{\rho_o} \quad (۷۱-۶)$$

معادله مومنتم برای بدست آوردن فشار سیال خروجی هر حجم

$$p_{out} = p_{in} + \rho_{m,out} v_{out}^2 - \rho_{m,in} v_{in}^2 - \frac{f \rho_{m,out} v_{ave}^2}{2D_e} \Delta z - \rho_{m,out} g \Delta z \quad (۷۲-۶)$$

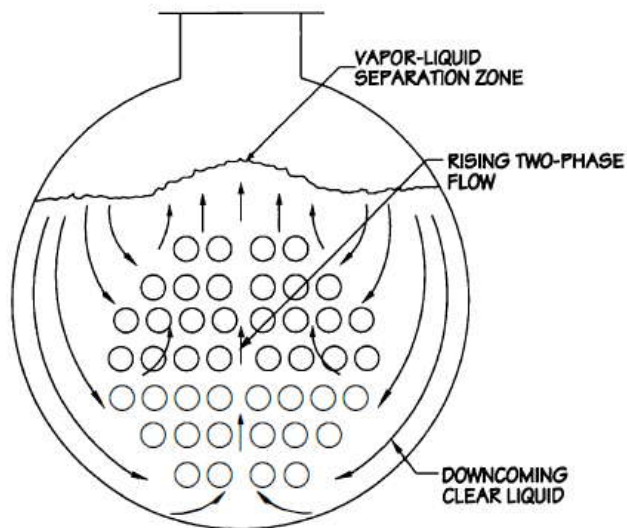
معادله انرژی برای بدست آوردن آنتالپی سیال خروجی هر حجم

$$h_{out} = h_{in} + \frac{q'' P_h \Delta z}{\rho_m v_{ave} A_z} + \frac{1}{\rho_m} p_{out} - p_{in} + \frac{f v_{ave}^2 \Delta z}{2 D_e} \quad (۷۳-۶)$$

پارامتر  $P_h$  در رابطه (۷۳-۶) محیط گرم شده برای یک کانال متشکل از چهار لوله که برابر محیط یک لوله می‌باشد. لازم به ذکر است روابط گسسته فوق در حالت پایا می‌باشد و برای حل حالت گذرا روابط فوق در هر گام زمانی حل می‌گردد.

۶-۶-۳- مدل‌سازی بخش ثانویه (پوسته)

الگوی گردش جریان سیال در یک مولد بخار در شکل ۲۲ نشان داده شده است. در پایین دسته لوله‌ها مایع مادون سرد (آب تغذیه) در تماس با سطح خارجی داغ لوله‌ها قرار می‌گیرد و با عبور از میان ردیف‌های لوله‌ها حرارت مدار اول را برداشت نموده و دمای آن تا رسیدن به دمای جوش افزایش می‌یابد. با ادامه این روند حرارت از مدار اول بصورت گرمای نهان تبخیر به مخلوط آب و بخار بخش ثانویه منتقل می‌گردد. این امر باعث افزایش کیفیت سیال می‌شود. نوع چیدمان دسته لوله‌ها، پارامترهای محلی مانند کسر حجمی بخار و ضریب انتقال حرارت را تحت تأثیر قرار می‌دهد.



شکل ۲۲: الگوی گردش جریان در پوسته یک مولد بخار

هنگامی که مخلوط دوفاز به بالای دسته لوله‌ها می‌رسد، فاز بخار جدا شده و مایع باقیمانده به طرف دیواره پوسته رانده می‌شود. اختلاف بین چگالی مخلوط دوفاز در مرکز دسته لوله‌ها و پوسته، باعث ایجاد گردش فاز مایع در داخل مولد بخار می‌شود.

## ۶-۳-۱- جوشش با جابجایی اجباری

جوشش بصورت حباب‌های تشکیل شده در سطح داخلی لوله حاوی مایع گرم تعریف می‌شود. در شرایط جوشش با جریان اجباری، رشد و جدایی حباب به شدت تحت تأثیر سرعت جریان قرار دارد و اثر هیدرودینامیکی در این حالت با اثر متناظر در جوشش استخری تفاوت دارد.

انتقال گرما به مایع مادون سرد ورودی به قسمت لوله، ابتدا از طریق جابجایی اجباری صورت می‌پذیرد. با شروع جوشش، حباب‌هایی در سطح لوله ظاهر می‌شوند که رشد کرده و به داخل جریان منتقل می‌شوند. در این جریان حبابی، ضریب انتقال حرارت جابجایی افزایش پیدا می‌کند.

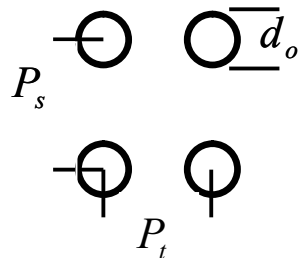
به دلیل تماس سطح لوله با مایع، افزایش ضریب انتقال حرارت در جریان حبابی و خصوصاً در جریان حلقوی رخ می‌دهد. در ادامه‌ی جریان حلقوی، نقاط خشک روی سطح داخلی ظاهر می‌شود و ضریب انتقال حرارت شروع به کاهش می‌کند. مرحله گذار، با پیدایش نقاط خشک شروع و تا جایی ادامه می‌یابد که سطح کاملاً خشک شود و تمام مایع باقیمانده بصورت قطره‌هایی ظاهر شود. در این مرحله کاهش ضریب انتقال حرارت همچنان ادامه پیدا می‌کند و در ادامه شرایط بخار به شرایط مافوق گرم می‌رسد.

۶-۳-۲- مدل‌سازی جریان بخش ثانویه با مدل دوفاز همگن تعادلی

در این بخش پارامترهای ضریب اصطکاک سیال دوفاز و ضریب انتقال حرارت جوشش در پوسته محاسبه می‌شود. برای استفاده از این روابط در بخش ثانویه مولد بخار نیاز به یک سری اصلاحات است. پارامتر  $D_h$  در رابطه (۶-۷۴) بر اساس هندسه چیدمان لوله‌های مولد بخار بصورت زیر محاسبه می‌شود.

$$D_h = \frac{4}{\pi d_o} \left( P_t P_s - \frac{\pi d_o^2}{4} \right) \quad (۶-۷۴)$$

در رابطه فوق،  $P_t$ ، فاصله افقی بین مراکز دو لوله،  $P_s$ ، فاصله عمودی بین مراکز دو لوله و  $d_o$ ، قطر خارجی لوله است که در شکل ۲۳ نشان داده شده‌اند.



شکل ۲۳: فاصله افقی و عمودی بین لوله‌های مولد بخار

#### ۶-۳-۳- افت فشار اصطکاکی

یکی از پارامترهای مهم در طراحی مولد بخار و چگالنده در بخش پوسته، محاسبه افت فشار جریان دوفاز می‌باشد. این پارامتر از روابط مشابه استفاده شده در مدل‌های کانال و تک حجم به دست آمده است.

#### ۶-۳-۴- ضریب انتقال حرارت دوفاز

پیش بینی دقیق ضریب انتقال حرارت برای سیال تکفاز با تقریب ۳۰ درصد، تقریب مناسبی است. در سیال دوفاز محاسبه این پارامتر با همان دقت دشوارتر است. ضریب انتقال حرارت در بخش پوسته با استفاده از روابط زیر بدست می‌آید [۸].

$$h_{2\phi} = Sh_{nb} + Fh_{conv} \quad (75-6)$$

در این رابطه  $h_{conv}$ ، ضریب انتقال حرارت تکفاز،  $S$  فاکتور منع رشد حباب<sup>۲۱</sup> است که از رابطه (۷۶-۶)،  $h_{nb}$ ، ضریب انتقال حرارت جوش هسته‌ای است که از رابطه (۷۸-۶) و  $F$ ، ضریب اصلاح عدد رینولدز دوفاز مؤثر است که از رابطه (۷۹-۶) بدست می‌آیند.

$$S = \frac{k_l}{h_{conv} X_0} \left( 1 - e^{-\frac{h_{conv} X_0}{k_l}} \right) \quad (76-6)$$

در این رابطه،  $k_l$  ضریب رسانش مایع و  $X_0$ ، از رابطه (۷۷-۶) بدست می‌آید.

$$X_0 = 0.041 \left( \frac{g_c \sigma}{g (\rho_l - \rho_g)} \right) \quad (77-6)$$

در این رابطه،  $\sigma$  کشش سطحی،  $\rho$  چگالی،  $g_c$  ضریب تبدیل شتاب جاذبه برابر ۳۲/۱۸ و  $g$  شتاب جاذبه است.

---

21- Bubble-growth suppression factor



$$h_{nb} = Aq^b \quad (78-6)$$

در این رابطه  $A$  و  $b$  ضرایب ثابتی هستند که برای سیال آب در مولد بخار پوسته و لوله با چیدمان مربعی به ترتیب برابر با  $5/1$  و  $0/673$  می‌باشند.  $q$ ، شار حرارتی منتقل شده از لوله‌ها به سیال ثانویه است.

$$F = (\phi_l^2)^{\frac{n}{2-m}} \quad (79-6)$$

در این رابطه  $n$  و  $m$  به ترتیب توان عدد رینولدز بکار رفته در محاسبه ضریب انتقال حرارت تکفاز و رابطه فاکتور اصطکاک معادله بلازیوس، به ترتیب برابر با  $0/63$  و  $0/25$  می‌باشند.  $\phi_l^2$  ضریب اصطکاک دوفاز است و از رابطه (80-6) بدست می‌آید.

$$\phi_l^2 = \frac{\Delta P_{2\phi,fric}}{\Delta P_{l,fric}} \quad (80-6)$$

در رابطه (80-6)،  $\Delta P_{2\phi,fric}$ ، افت فشار اصطکاکی جریان دوفاز و  $\Delta P_{l,fric}$ ، افت فشار اصطکاکی مایع است. برای به دست آوردن  $\phi_l^2$  رابطه (81-6) و (82-6) پیشنهاد شده است.  $x_{tt}^2$  ضریب Lockhart-Martinelli است.

$$\phi_l^2 = 1 + \frac{C}{x_{ll}} + \frac{1}{x_{ll}^2} \quad (۸۱-۶)$$

$$x_{ll}^2 = \left( \frac{1-x}{x} \right)^{2-m} \left( \frac{\rho_g}{\rho_l} \right) \left( \frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^m \quad (۸۲-۶)$$

در رابطه (۸۱-۶)، ضریب C، بر اساس آزمایش‌های تجربی به دست آمده است. بر اساس آزمایش‌های متعدد انجام شده توسط Ishihara و همکارانش، مقدار این ضریب برای جریان‌های دوفاز با لوله‌های افقی برای  $x_{ll}$  کوچکتر از ۰/۲، برابر ۸ پیشنهاد شده است. در این کد نیز از این مقدار استفاده شده است.

در رابطه (۷۵-۶)،  $h_{conv}$ ، ضریب انتقال حرارت تکفاز است که بر اساس رابطه ناسلت (۸۳-۶) برای چیدمان مربعی لوله‌ها و رابطه (۸۴-۶) برای چیدمان شطرنجی بدست می‌آید.

$$Nu = 0.27 Re^{0.63} Pr^{0.36} \left( \frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0.25} \quad (۸۳-۶)$$

$$Nu = 0.35 \left( \frac{P}{D} \right)^{0.2} Re^{0.6} Pr^{0.3} \left( \frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0.25} \quad (۸۴-۶)$$

رابطه دیگری برای محاسبه ضریب انتقال حرارت تکفاز در بخش ثانویه ارائه شده است که از ضرب ضرایبی در ضریب جابجایی ایده‌آل بدست می‌آید [۸].

$$h_{conv} = h_{id} J_c J_l J_b J_s J_r \quad (۸۵-۶)$$

ضریب جابجایی ایده‌آل از رابطه (۸۶-۶) بدست می‌آید.

$$h_{id} = j_j c_p \left( \frac{\dot{m}}{A} \right) \left( \frac{k}{c_p \mu} \right)^{2/3} \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (۸۶-۶)$$

در این رابطه  $j_j$  ضریبی است که از رابطه (۸۷-۶) بدست می‌آید.  $c_p$ ، ظرفیت گرمایی آب،  $\dot{m}$ ، دبی جرمی،  $A$ ، سطح محصور بین چهار لوله،  $k$ ، ضریب رسانش حرارتی آب،  $\mu$ ، لزجت دینامیکی آب و  $\mu_w$ ، لزجت دینامیکی آب در دمای سطح لوله‌ها است. با توجه به اینکه این دو لزجت تقریباً برابرند و از طرف دیگر توزیع دما در دیواره لوله محاسبه نمی‌شود، نسبت این دو لزجت برابر ۱ در نظر گرفته شده است.

$$j_j = a_1 \left( \frac{1.33d_o}{P_t} \right)^a (Re_s)^{a_2} \quad (۸۷-۶)$$

$$a = \frac{a_3}{1 + 0.14(Re_s)^{a_4}} \quad (۸۸-۶)$$

ضرایب به کار رفته در روابط (۸۷-۶) و (۸۸-۶) در جدول شماره ۴ ارائه شده است و ضرایب بکار رفته در رابطه (۸۵-۶) عبارتند از:

- (J<sub>C</sub>) - ضریب تصحیح اثر صفحات نگه دارنده دسته لوله‌ها برابر ۱ می‌باشد.
- (J<sub>I</sub>) - ضریب تصحیح اثرات ناشی دیواره برابر ۰/۷۵ می‌باشد.
- (J<sub>b</sub>) - ضریب تصحیح اثرات جریان‌های کنارگذر برابر ۰/۹ می‌باشد.
- (J<sub>s</sub>) - ضریب تصحیح فاصله متغیر دیواره برابر ۰/۹ می‌باشد.
- (J<sub>r</sub>) - ضریب تصحیح عدد رینولدز کمتر از ۱۰۰ است. در اینجا  $Re > 100$  بوده و در نتیجه این ضریب برابر ۱ می‌باشد.

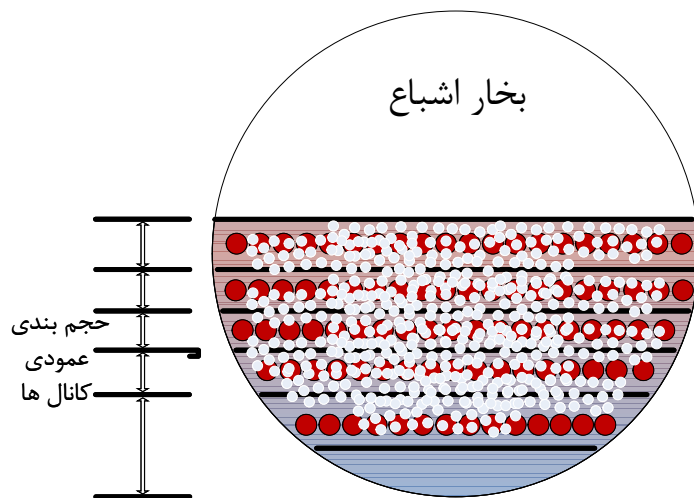
جدول شماره ۴: ضرایب مورد نیاز برای محاسبه ضریب جابجایی حرارتی جریان تکفاز در بخش ثانویه مولد بخار [۸]

$a_4$	$a_3$	$a_2$	$a_1$	عدد رینولدز
0.37	1.187	-0.395	0.37	$10^5 - 10^4$
0.37	1.187	-0.266	0.107	$10^4 - 10^3$
0.37	1.187	-0.460	0.408	$10^3 - 10^2$
0.37	1.187	-0.631	0.900	$10^2 - 10$
0.37	1.187	-0.667	0.970	10

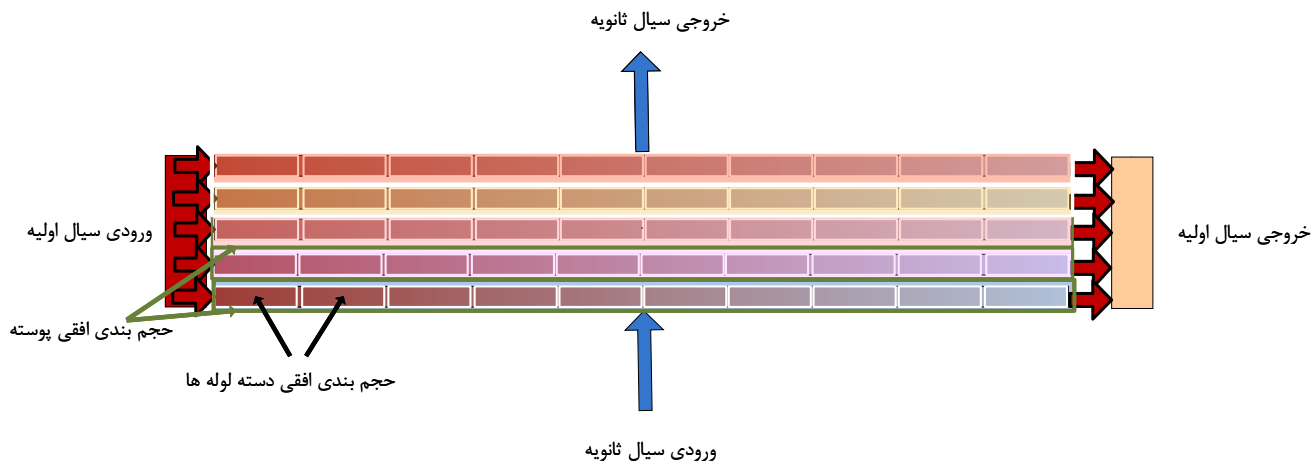
#### ۶-۷- حجم‌بندی مولد بخار

حجم‌بندی در نظر گرفته شده مطابق شکل ۲۴ و شکل ۲۵ می‌باشد. کاربر بصورت دلخواه می‌تواند هر یک از ردیف‌های چندگانه دسته لوله را بعنوان یک کانال افقی و در جهت جریان داخل دسته لوله‌ها آنها را به تعداد حجم‌های دلخواه تقسیم کند. محاسبات برای هر ردیف از کانال‌ها که بعنوان حجم کنترل در نظر گرفته شده است، بطور جداگانه انجام می‌شود. در نهایت دمای خروجی مبدل حرارتی در سمت اولیه،

دمای متوسط جریان‌های خروجی هر یک از کانال‌ها و در بخش ثانویه، دما و شرایط سیال خروجی از حجم آخر (حجم خروجی) می‌باشد. مقدار حرارت منتقل شده نیز برابر با مجموع حرارت منتقل شده در هر یک از حجم کنترل‌ها می‌باشد.



شکل ۲۴: حجم‌بندی دسته لوله‌ها در راستای عمودی (هر کانال یک حجم در بخش پوسته و لوله)



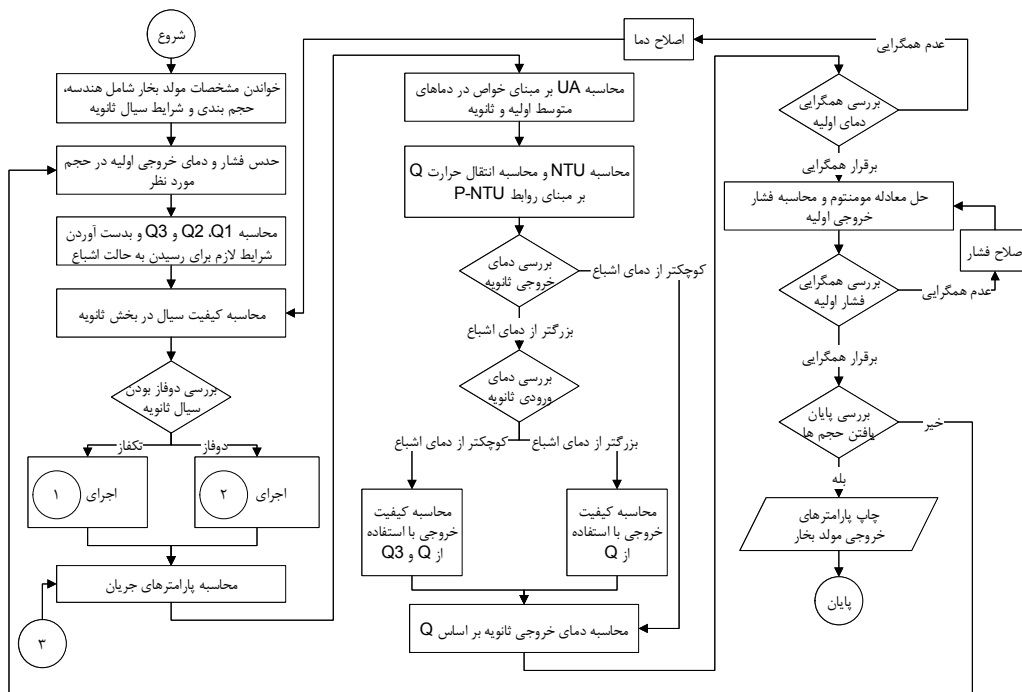
شکل ۲۵: حجم‌بندی دسته لوله‌ها در راستای افقی

## ۶-۷-۱- روندنمای اجرای برنامه و مدل‌سازی مبدل حرارتی

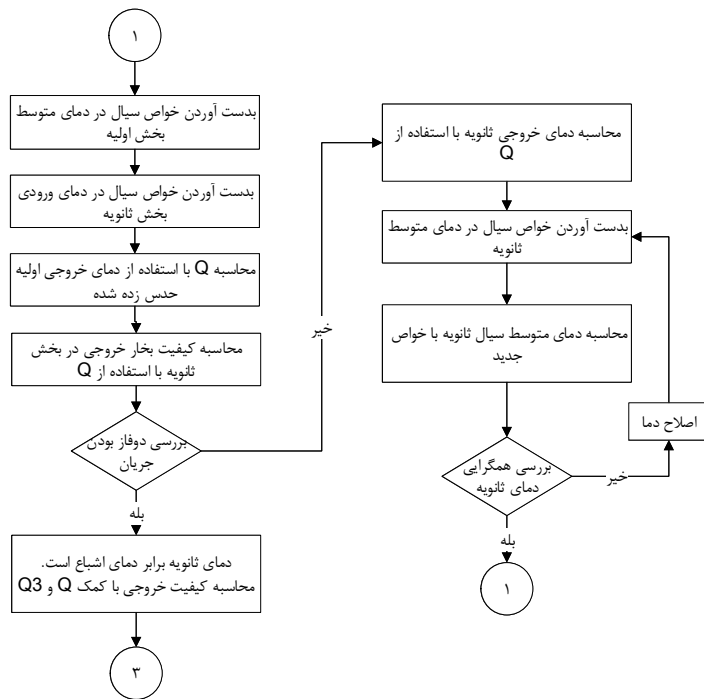
روندنمای کلی اجرای برنامه محاسبات انتقال حرارت سیال در مبدل حرارتی با جریان تکفاز اولیه و جریان دوفاز همگن ثانویه در شکل ۲۶، شکل ۲۷ و شکل ۲۸ نشان داده شده است. بر اساس شکل ۲۶ پس از پردازش اولیه داده‌های ورودی و مشخص شدن ابعاد مسئله و نوع حجم‌بندی اولیه و ثانویه،  $Q_1$  و  $Q_2$  و  $Q_3$  که به ترتیب میزان انرژی لازم برای رسیدن از دمای اولیه به بخار اشباع، میزان انرژی لازم برای رسیدن از مایع اشباع به بخار اشباع و میزان انرژی لازم برای رسیدن از مایع اشباع به بخار اشباع و میزان انرژی لازم برای رسیدن از دمای اولیه به مایع اشباع می‌باشند، محاسبه می‌شوند. سپس کیفیت ورودی حجم در بخش ثانویه بررسی می‌شود. در صورتیکه سیال ورودی به حجم در بخش ثانویه در حالت مادون سرد باشد، برای محاسبه خواص ترمودینامیکی و حدس دمای اولیه و محاسبه توان و دمای خروجی ثانویه از الگوریتم ۱ (شکل ۲۷) استفاده می‌شود. در این حالت اگر دمای خروجی ثانویه اشباع باشد، برنامه با فرض دمای اشباع برای خروجی و محاسبه کیفیت بخار خروجی به بخش بعد می‌رود. در صورتیکه سیال ورودی به حجم در بخش ثانویه در حالت اشباع باشد، از الگوریتم ۲ (شکل ۲۸) استفاده می‌شود. در این حالت دمای خروجی ثانویه دمای اشباع فرض شده و با حدس دمای خروجی اولیه و پس از همگرایی آن، خواص ترمودینامیکی محاسبه می‌شوند. با استفاده از الگوریتم ۱ و ۲ خواص سیال و پارامترهای جریان مورد نیاز برای روابط P-NTU محاسبه می‌شوند. با استفاده از روابط P-NTU توان انتقالی از حجم اولیه به ثانویه محاسبه و سپس شرایط سیال خروجی با استفاده از این توان بررسی می‌شود. در صورتیکه دمای خروجی محاسبه شده بیشتر



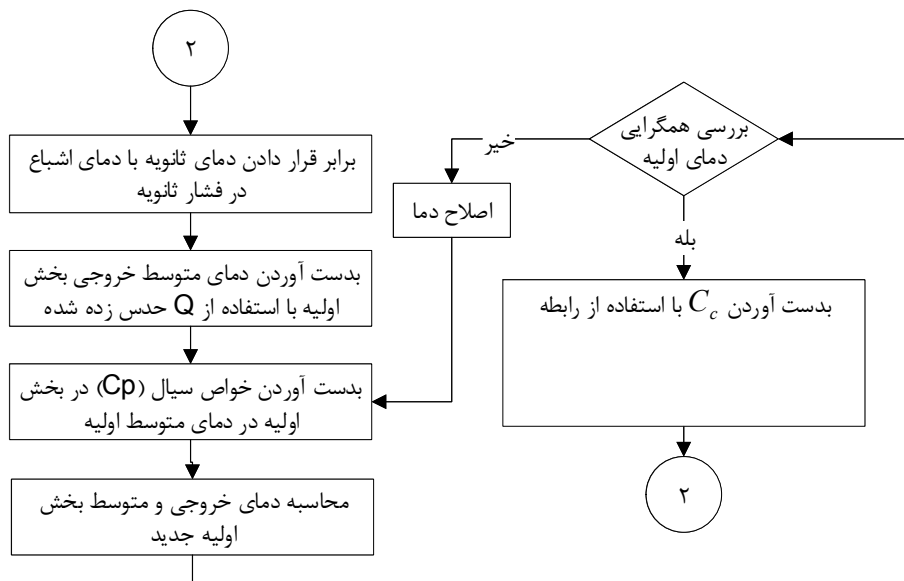
از دمای اشباع باشد، ابتدا دمای ورودی ثانویه بررسی شده و در صورت اشباع بودن مقادیر کیفیت و دمای خروجی اولیه جدید بر حسب  $Q$  جدید حاصل از روابط  $P$ - $NTU$  محاسبه و در نهایت همگرایی آن بررسی می‌شود. در صورتیکه دمای ورودی حجم ثانویه اشباع نباشد، کیفیت خروجی بر حسب روابط دیگری محاسبه شده و اگر دمای خروجی ثانویه اشباع نباشد، دمای خروجی اولیه جدید بر حسب  $Q$  جدید ( $P$ - $NTU$ ) محاسبه و در نهایت پس از همه این شرط‌ها و محاسبه دمای خروجی اولیه جدید، همگرایی این دما نسبت به دمای حدس زده شده بررسی می‌شود. در صورت عدم همگرایی این دما بعنوان دمای حدس جدید در نظر گرفته می‌شود. در پایان با همگرایی این دما محاسبه برای حجم بعدی بصورت افقی ادامه می‌یابد. دمای خروجی از هر حجم به عنوان دمای حدس زده شده حجم بعدی در نظر گرفته می‌شود. در ادامه با حل معادلات پیوستگی جرم و مومنتم، مقدار فشار سیال خروجی از حجم کنترل بدست می‌آید.



شکل ۲۶: روندنمای کلی حل مدل مولد بخار



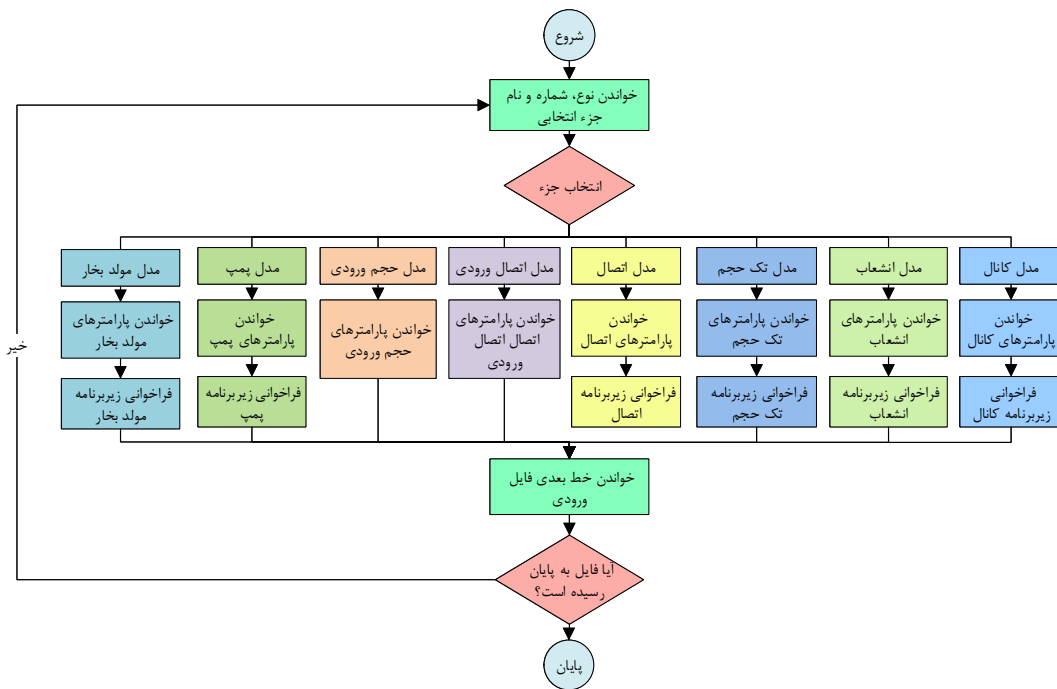
شکل ۲۷: روندنمای حل حالت تکفاز مولد بخار



شکل ۲۸: روندنمای حل حالت دوفاز مولد بخار

## ۷- الگوریتم حل

الگوریتم حل کلی برنامه در شکل ۲۹ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، برنامه ابتدا نوع جزء انتخابی توسط کاربر را شناسایی کرده و برنامه مربوط به آن را برای محاسبات فراخوانی می‌کند. همین روند برای اجزای بعدی تکرار می‌کند. در جزء کانال لوله، 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 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 ۲۹: روندنمای برنامه مدار

## ۸- قابلیت‌های کد

کد LOOP-I قادر است مدارهای نیروگاهی شامل قلب راکتور، پمپ‌های گردش جریان، خطوط لوله و مولد بخار را در حالت پایا مدل‌سازی نماید. در این کد با معلوم بودن شرایط مسأله در یک موقعیت از مدار، پارامترهای ترموهیدرولیکی بصورت جزء به جزء و رو به جلو در بخش‌های مختلف مدار محاسبه می‌شوند. قابلیت‌های در نظر گرفته شده برای کاربر عبارتند از:

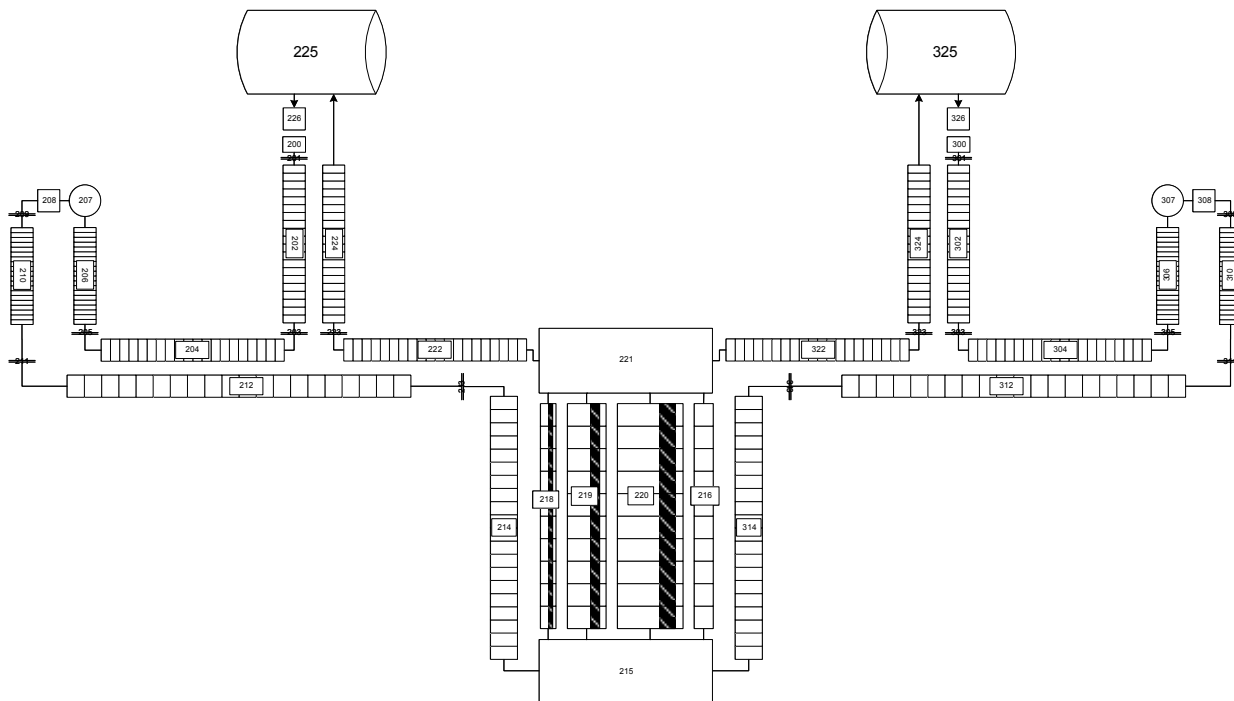
- انتخاب تعداد دلخواه گره شعاعی در سوخت، غلاف سوخت و فاصله‌گازی برای به دست آوردن توزیع دما
- امکان انتخاب تولید حرارت در غلاف سوخت و فاصله‌گازی به عنوان کسری از گرمای تولید شده علاوه بر سوخت
- انتخاب ضریب رسانش سازه حرارتی (میله سوخت) بصورت عدد ثابت یا استفاده از توابع پیشفرض کد برای ضریب رسانش حرارتی بر حسب دما
- امکان تعیین ضرایب توزیع توان محوری در طول میله سوخت
- امکان مدل‌سازی تیغه سوخت به جای میله سوخت برای راکتورهای با سوخت تیغه‌ای
- امکان انتخاب روش حل هیدرولیکی سیال دوفاز به دو روش همگن و شار رانشی

- امکان انتخاب زاویه کانال، انشعاب یا تک حجم بین سه حالت کانال افقی، قائم رو به پایین و قائم رو به بالا (به ترتیب ۰، ۲۷۰ و ۹۰ درجه)
- امکان تعیین ضریب افت فشار در کانال بصورت دستی توسط کاربر
- امکان مدل‌سازی انشعاب با حداکثر ۱۰ اتصال ورودی و ۱۰ اتصال خروجی
- امکان محاسبه ضریب افت فشار اتصالات توسط کد یا تعیین توسط کاربر
- امکان استفاده از انواع اتصالات ساده، شیرها، زانویی‌ها و ...
- امکان مدل‌سازی پمپ با مشخصات کاربر و دو پمپ پیش‌فرض کد (بینگهام و وستینگهاوس)
- امکان مدل‌سازی مولد بخار با تعیین تعداد دسته لوله‌های بخش اولیه، گام افقی و گام عمودی دسته لوله‌ها توسط کاربر
- امکان مدل‌سازی راکتور به همراه یک یا چند مدار مجزا



## ۹- اعتبارسنجی

برای بررسی صحت عملکرد کد LOOP-I سه مسأله نمونه بر اساس مشخصات نیروگاه بوشهر با دو، سه و چهار مدار که شامل قلب راکتور خطوط لوله مدار اولیه، پمپ گردش سیال و مولد بخار می‌باشد، بررسی شده است. برای بررسی صحت نتایج از گزارش نهایی تحلیل ایمنی [۹] و همچنین کد RELAP5 [۳] استفاده شده است. در شکل ۳۰ حجم‌بندی مربوط به مسأله دو مدار نشان داده شده است و در جدول شماره ۵ مشخصات مسأله به تفکیک ارائه شده است. در این جدول مشخصات تنها برای یک مدار آورده شده و از تکرار پرهیز شده است. در جدول شماره ۶ و جدول شماره ۷ پارامترهای ترموهیدرولیکی محاسبه شده توسط دو کد LOOP-I و RELAP5 ارائه شده است.



شکل ۳۰: حجم‌بندی مربوط به مسأله با دو مدار

جدول شماره ۵: اجزای به کار رفته در مسأله

شماره	نوع	مشخصات
۲۰۰	حجم ورودی	فشار: ۱۵/۴۷ مگاپاسکال دما: ۵۶۴/۱۵ کلوین
۲۰۱	اتصال ورودی	مساحت: ۰/۵۶۷ مترمربع دبی ورودی: ۴۲۵۰ کیلوگرم بر ثانیه نوع: اتصال ساده
۲۰۲	کانال	تعداد حجم: ۱۰ طول هر حجم: ۰/۵۵ متر سطح مقطع: ۰/۵۶۷ مترمربع زاویه: ۲۷۰ درجه
۲۰۳	اتصال	مساحت: ۰/۵۶۷ مترمربع نوع: زانویی از جزء شماره ۲۰۲ به جزء شماره ۲۰۴
۲۰۴	کانال	تعداد حجم: ۱۰

	طول هر حجم: ۰/۵۸۸ متر سطح مقطع: ۰/۵۶۷ مترمربع زاویه: ۰ درجه		
۲۰۵	اتصال	مساحت: ۰/۵۶۷ مترمربع نوع: زانویی از جزء شماره ۲۰۴ به جزء شماره ۲۰۶	
۲۰۶	کانال	تعداد حجم: ۱۰ طول هر حجم: ۰/۳۲۶ متر سطح مقطع: ۰/۵۶۷ مترمربع زاویه: ۹۰ درجه	
۲۰۷	پمپ	مشخصات پمپ مدار اول نیروگاه بوشهر [۹]	
۲۰۸	تک حجم	طول: ۰/۳ متر سطح مقطع: ۰/۵۶۷ مترمربع زاویه: ۰ درجه	
۲۰۹	اتصال	مساحت: ۰/۵۶۷ مترمربع	

	نوع: زانویی از جزء شماره ۲۰۸ به جزء شماره ۲۱۰		
۲۱۰	کانال تعداد حجم: ۱۰ طول هر حجم: ۰/۳۲۶ متر سطح مقطع: ۰/۵۶۷ مترمربع زاویه: ۲۷۰ درجه		
۲۱۱	اتصال نوع: زانویی از جزء شماره ۲۱۰ به جزء شماره ۲۱۲		
۲۱۲	کانال تعداد حجم: ۱۰ طول هر حجم: ۱/۰۵ متر سطح مقطع: ۰/۵۶۷ مترمربع زاویه: ۰ درجه		
۲۱۳	اتصال مساحت: ۰/۵۶۷ مترمربع نوع: زانویی		

		از جزء شماره ۲۱۲ به جزء شماره ۲۱۴	
۲۱۴	کانال	تعداد حجم: ۱۰ طول هر حجم: ۰/۷ متر سطح مقطع: ۰/۵۶۷ مترمربع زاویه: ۲۷۰ درجه	
۲۱۵	انشعاب	تعداد اتصالات ورودی: ۴ تعداد اتصالات خروجی: ۴ طول: ۱/۵ متر سطح مقطع: ۶ مترمربع زاویه: ۹۰ درجه	
۲۱۶	کانال (کانال کنارگذر)	تعداد حجم: ۱۰ طول هر حجم: ۰/۳۵۳ متر سطح مقطع: ۰/۱۶۵۶ مترمربع زاویه: ۹۰ درجه	
۲۱۸	کانال	تعداد حجم: ۱۰	

<p>طول هر حجم: ۰/۳۵۳ متر  سطح مقطع: ۰/۱۵۲۴ مترمربع  زاویه: ۹۰ درجه  توان تولیدی در کانال: ۱۴۲/۴۵۴ مگاوات  تعداد میله سوخت: ۱۸۶۶  مشخصات میله سوخت بوشهر  توزیع توان محوری: مطابق راکتور بوشهر است.  ضریب توزیع توان شعاعی: ۱/۲۹</p>	<p>(کانال ۱ قلب)</p>	
<p>تعداد حجم: ۱۰  طول هر حجم: ۰/۳۵۳ متر  سطح مقطع: ۱/۷۰۱۸ مترمربع  زاویه: ۹۰ درجه  توان تولیدی در کانال: ۱۴۲۶/۵۶۵ مگاوات  تعداد میله سوخت: ۲۰۸۳۷  مشخصات میله سوخت بوشهر</p>	<p>کانال (کانال ۲ قلب)</p>	<p>۲۱۹</p>

	توزیع توان محوری: مطابق راکتور بوشهر است. ضریب توزیع توان شعاعی: ۱/۱۵۶۷		
	تعداد حجم: ۱۰ طول هر حجم: ۰/۳۵۳ متر سطح مقطع: ۲/۲۸۶ مترمربع زاویه: ۹۰ درجه توان تولیدی در کانال: ۱۴۳۲/۲۷۰ مگاوات تعداد میله سوخت: ۲۷۹۹۰ مشخصات میله سوخت بوشهر توزیع توان محوری: مطابق راکتور بوشهر است. ضریب توزیع توان شعاعی: ۰/۸۶۵	کانال (کانال ۳ قلب)	۲۲۰
	تعداد اتصالات ورودی: ۴ تعداد اتصالات خروجی: ۴ طول: ۰/۵ متر سطح مقطع: ۶ مترمربع	انشعاب	۲۲۱



	زاویه: ۹۰ درجه		
۲۲۲	کانال	تعداد حجم: ۱۰ طول هر حجم: ۰/۹۲۵ متر سطح مقطع: ۰/۵۶۷ مترمربع زاویه: ۹۰ درجه	
۲۲۳	اتصال	مساحت: ۰/۵۶۷ مترمربع نوع: اتصال ساده از جزء شماره ۲۲۲ به جزء شماره ۲۲۴	
۲۲۴	کانال	تعداد حجم: ۱۰ طول هر حجم: ۰/۷ متر سطح مقطع: ۰/۵۶۷ مترمربع زاویه: ۹۰ درجه	
۲۲۵	مولد بخار	تعداد لوله‌های بخش اولیه: ۱۱۰۰۰ گام افقی لوله‌ها: ۰/۰۲۳ متر گام عمودی لوله‌ها: ۰/۰۱۹ متر	

<p>شعاع داخلی لوله‌ها: ۰/۰۰۶۵ متر  ضخامت لوله‌ها: ۰/۰۰۱۵ متر  طول متوسط دسته لوله‌ها: ۱۱/۱ متر  سطح عبور جریان ورودی: ۰/۵۶۷ مترمربع  فشار ورودی ثانویه: ۶/۲۷ مگاپاسکال  دمای ورودی ثانویه: ۴۹۳/۱۵ کلوین  دبی آب تغذیه: ۴۰۸/۶۶۶ کیلوگرم بر ثانیه  ضریب رسانش حرارتی لوله‌ها: ۳۵/۶</p> <p>تنها برای ورودی کد LOOP نیاز است. در ورودی کد RELAP5 یک مولد بخار با اجزای کانال و انشعاب تهیه شده است.</p>			
	تنها برای کد RELAP5 نیاز است.	اتصال	۲۳۰
	تنها برای کد RELAP5 نیاز است.	حجم وابسته به زمان	۲۳۱

جدول شماره ۶: پارامترهای هیدرولیکی محاسبه شده و نتایج کد RELAP5 در مسأله چهار مدار نیروگاه بوشهر

LENGTH (m)	VELOCITY (m/s)		DENSITY (kg/m <sup>3</sup> )		PRESSURE (kPa)		BULK TEMP (K)	
	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP
-	10.071	10.070	744.28	744.38	15473.6	15473.6	564.1	564.1
0.275	10.071	10.069	744.31	744.39	15477.4	15477.4	564.1	564.1
0.825	10.070	10.069	744.31	744.39	15481.1	15481.1	564.1	564.1
1.375	10.070	10.069	744.32	744.39	15484.9	15484.9	564.1	564.1
1.925	10.070	10.069	744.32	744.40	15488.6	15488.6	564.1	564.1
2.475	10.070	10.069	744.32	744.40	15492.4	15492.4	564.1	564.1
3.025	10.070	10.069	744.33	744.40	15496.2	15496.1	564.1	564.1
3.575	10.070	10.069	744.33	744.41	15499.9	15499.9	564.1	564.1
4.125	10.070	10.069	744.33	744.41	15503.7	15503.7	564.1	564.1
4.675	10.070	10.069	744.34	744.41	15507.4	15507.4	564.1	564.1
5.225	10.070	10.069	744.34	744.41	15507.4	15507.4	564.1	564.1
<b>Number: 204 - Type: channel - cold leg</b>								
LENGTH (m)	VELOCITY(m/s)		DENSITY(kg/m <sup>3</sup> )		PRESSURE(kPa)		BULK TEMP(K)	
	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP
-	10.071	10.07	744.31	744.37	15462.0	15461.9	564.1	564.1
0.294	10.071	10.07	744.27	744.37	15461.7	15461.7	564.1	564.1

1.47	10.071	10.07	744.27	744.37	15461.4	15461.4	564.1	564.1
2.058	10.071	10.07	744.27	744.37	15461.2	15461.1	564.1	564.1
2.646	10.071	10.07	744.27	744.37	15460.9	15460.8	564.1	564.1
3.234	10.071	10.07	744.27	744.37	15460.6	15460.6	564.1	564.1
3.822	10.071	10.07	744.27	744.37	15460.4	15460.3	564.1	564.1
4.41	10.071	10.07	744.27	744.37	15460.1	15460.0	564.1	564.1
4.998	10.071	10.07	744.31	744.37	15459.8	15459.8	564.1	564.1
5.586	10.071	10.07	744.27	744.37	15459.5	15459.5	564.1	564.1

Number: 206 - Type: channel - cold leg

LENGTH (m)	VELOCITY(m/s)		DENSITY(kg/m <sup>3</sup> )		PRESSURE(kPa)		BULK TEMP(K)	
	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP
-	10.07	10.07	744.263	744.36	15449.0	15449.0	564.1	564.1
0.294	10.07	10.07	744.254	744.35	15446.4	15446.5	564.1	564.1
0.882	10.07	10.07	744.252	744.35	15443.9	15443.9	564.1	564.1
1.47	10.07	10.07	744.249	744.35	15441.4	15441.4	564.1	564.1
2.058	10.07	10.07	744.247	744.35	15438.8	15438.9	564.1	564.1
2.646	10.07	10.07	744.244	744.34	15436.3	15436.4	564.1	564.1
3.234	10.07	10.07	744.242	744.34	15433.8	15433.8	564.1	564.1
3.822	10.07	10.07	744.239	744.34	15431.2	15431.3	564.1	564.1
4.41	10.07	10.07						

4.998	10.07	10.07	744.236	744.34	15428.7	15428.8	564.1	564.1	
5.586	10.07	10.07	744.234	744.33	15426.2	15426.2	564.1	564.1	
<b>Number: 207 - Type: pump</b>									
<b>VELOCITY (m/s)</b>		<b>HEAD (m)</b>		<b>TORQUE(N.m)</b>		<b>PRESSURE(kPa)</b>		<b>BULK TEMP(K)</b>	
LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP
10.055	10.066	101.4	109.2	44384.4	44664.0	15788.6	15795.7	564.1	564.2
<b>Number: 214</b>				<b>Type: channel - down comer</b>					
<b>LENGTH (m)</b>		<b>VELOCITY(m/s)</b>		<b>DENSITY(kg/m<sup>3</sup>)</b>		<b>PRESSURE(kPa)</b>		<b>BULK TEMP(K)</b>	
-		LOOP-I	RELAP5	LOOP-I	RELAP5	LOOP-I	RELAP5	LOOP-I	RELAP5
0.35		10.058	10.062	745.266	744.95	16123.9	16123.9	564.2	564.4
1.05		10.058	10.062	745.222	744.93	16107.9	16107.9	564.2	564.4
1.75		10.059	10.062	745.2	744.91	16091.9	16091.9	564.2	564.4
2.45		10.059	10.063	745.2	744.9	16075.9	16076.0	564.2	564.3
3.15		10.059	10.063	745.1	744.88	16059.9	16060.0	564.2	564.3
3.85		10.060	10.063	745.1	744.87	16043.9	16044.0	564.2	564.3
4.55		10.060	10.063	745.1	744.85	16027.9	16028.0	564.2	564.3
5.25		10.060	10.063	745.1	744.84	16011.9	16012.1	564.2	564.3
5.95		10.061	10.064	745.0	744.82	15995.9	15996.1	564.2	564.3
6.65		10.061	10.064	745.0	744.81	15979.9	15980.1	564.2	564.3

-	AV. VELOCITY(m/s)		DENSITY(kg/m <sup>3</sup> )		PRESSURE(kPa)		BULK TEMP(K)	
	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP
	5.30	5.32	744.977	744.77	15939.0	15939.7	564.2	564.3
MASS FLOW (kg/s)		Junction 1	Junction2	Junction 3	Junction 4	-		
	LOOP-I	653.80	601.69	6718.84	9025.30			
	RELAP	671.96	598.48	6637.20	9092.40			
<b>Number: 216 - Type: channel - core by pass</b>								
LENGTH (m)	VELOCITY(m/s)		DENSITY(kg/m <sup>3</sup> )		PRESSURE(kPa)		BULK TEMP(K)	
-	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP
0.176	5.300	5.448	744.94	744.74	15920.1	15919.6	564.2	564.3
0.529	5.300	5.448	744.92	744.73	15908.5	15907.5	564.2	564.3
0.882	5.300	5.448	744.90	744.71	15897.0	15895.5	564.2	564.3
1.236	5.300	5.448	744.88	744.70	15885.5	15883.5	564.2	564.3
1.588	5.300	5.448	744.87	744.68	15873.9	15871.4	564.2	564.3
1.942	5.300	5.449	744.85	744.66	15862.4	15859.4	564.2	564.3
2.295	5.301	5.449	744.84	744.65	15850.9	15847.4	564.2	564.3
2.647	5.301	5.449	744.82	744.63	15839.4	15835.4	564.2	564.3
3.000	5.301	5.449	744.81	744.62	15827.9	15823.3	564.2	564.3

3.353	5.301	5.449	744.79	744.60	15816.3	15811.3	564.2	564.2
<b>Number: 218 - Type: channel - core hot channel</b>								
LENGTH (m)	VELOCITY(m/s)		DENSITY(kg/m <sup>3</sup> )		PRESSURE(kPa)		BULK TEMP(K)	
	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP
-	5.317	5.308	742.500	739.8	15920.0	15920.9	566.7	566.9
0.176	5.368	5.374	735.516	730.7	15908.2	15909.3	571.3	571.5
0.529	5.444	5.461	725.250	719.1	15896.3	15897.5	576.9	577.1
1.236	5.536	5.560	713.188	706.3	15884.1	15885.6	582.6	582.8
1.588	5.637	5.665	700.402	693.3	15871.9	15873.6	588.1	588.4
1.942	5.741	5.770	687.710	680.7	15859.5	15861.4	593.0	593.4
2.295	5.844	5.871	675.639	668.8	15846.9	15849.1	597.4	597.7
2.647	5.939	5.962	664.793	658.7	15834.3	15836.6	600.8	601.2
3.000	6.018	6.031	656.049	651.1	15821.6	15824.1	603.3	603.7
3.353	6.070	6.068	650.388	647.2	15809.0	15811.5	604.5	604.9
<b>Number: 219 - Type: channel - core average channel</b>								
LENGTH (m)	VELOCITY(m/s)		DENSITY(kg/m <sup>3</sup> )		PRESSURE(kPa)		BULK TEMP(K)	
	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP
-	5.316	5.268	742.754	740.3	15920.0	15921.0	566.5	566.6
0.176	5.361	5.327	736.500	732.1	15908.3	15909.3	570.6	570.8

0.882	5.428	5.404	727.330	721.7	15896.3	15897.5	575.6	575.8
1.236	5.510	5.491	716.590	710.3	15884.3	15885.5	580.8	581.1
1.588	5.599	5.583	705.247	698.6	15872.1	15873.4	585.8	586.2
1.942	5.689	5.673	694.033	687.4	15859.8	15861.2	590.3	590.7
2.295	5.777	5.761	683.413	677.0	15847.4	15848.8	594.2	594.7
2.647	5.859	5.838	673.907	668.0	15834.9	15836.4	597.4	598.0
3.000	5.926	5.897	666.269	661.4	15822.4	15823.9	599.7	600.3
3.353	5.970	5.928	661.335	658.0	15809.9	15811.4	600.8	601.4

Number: 220 - Type: channel - core cold channel

LENGTH (m)	VELOCITY(m/s)		DENSITY(kg/m <sup>3</sup> )		PRESSURE(kPa)		BULK TEMP(K)	
-	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP
0.176	5.312	5.364	743.308	741.5	15920.0	15920.4	565.9	566.0
0.529	5.345	5.408	738.648	735.5	15908.3	15908.6	569.0	569.1
0.882	5.395	5.464	731.853	728.0	15896.5	15896.7	572.7	572.8
1.236	5.454	5.526	723.947	719.8	15884.6	15884.8	576.7	576.7
1.588	5.517	5.590	715.662	711.5	15872.6	15872.7	580.5	580.5
1.942	5.580	5.653	707.540	703.6	15860.5	15860.6	584.0	584.0
2.295	5.641	5.712	699.913	696.3	15848.4	15848.3	587.1	587.1
2.647	5.696	5.764	693.141	690.1	15836.2	15836.0	589.7	589.6



3.000	5.741	5.802	687.736	685.5	15824.0	15823.7	591.5	591.4
3.353	5.770	5.822	684.261	683.2	15811.8	15811.4	592.4	592.3
<b>Number: 221 - Type: branch - upper plenum</b>								
-	<b>OUT FLOW (kg/s)</b>		<b>DENSITY(kg/m<sup>3</sup>)</b>		<b>PRESSURE(kPa)</b>		<b>BULK TEMP(K)</b>	
	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP
	4249.98	4227.6	675.182	674.98	15789.6	15793.1	595.3	595.4
INLET VELOCITY (m/s)		Junction 1	Junction2	Junction 3	Junction 4	-		
	LOOP-I	5.301	6.088	5.985	5.780			
	RELAP	5.449	6.068	5.928	5.822			
<b>Number: 222 - Type: channel - hot leg</b>								
<b>LENGTH (m)</b>	<b>VELOCITY(m/s)</b>		<b>DENSITY(kg/m<sup>3</sup>)</b>		<b>PRESSURE(kPa)</b>		<b>BULK TEMP(K)</b>	
-	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP
0.463	11.099	11.048	675.344	674.910	15740.2	15741.9	595.2	595.4
1.388	11.100	11.048	675.290	674.900	15739.7	15741.5	595.2	595.4
2.312	11.100	11.048	675.289	674.900	15739.2	15741.0	595.2	595.4
3.238	11.100	11.048	675.288	674.900	15738.7	15740.5	595.2	595.4
4.162	11.100	11.048	675.287	674.900	15738.3	15740.1	595.2	595.4
5.088	11.100	11.048	675.286	674.900	15737.8	15739.6	595.2	595.4
6.012	11.100	11.048	675.285	674.900	15737.3	15739.1	595.2	595.4

6.938	11.100	11.048	675.284	674.900	15736.8	15738.6	595.2	595.4	
7.862	11.100	11.048	675.283	674.900	15736.3	15738.2	595.2	595.4	
8.787	11.100	11.048	675.282	674.900	15735.9	15737.7	595.2	595.4	
<b>Number: 224 - Type: channel - hot leg</b>									
LENGTH (m)	VELOCITY(m/s)		DENSITY(kg/m <sup>3</sup> )		PRESSURE(kPa)		BULK TEMP(K)		
-	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP	
0.185	11.100	11.048	675.248	674.850	15703.4	15705.2	595.2	595.4	
0.555	11.101	11.048	675.213	674.850	15700.8	15702.6	595.2	595.4	
0.925	11.101	11.049	675.209	674.840	15698.1	15700.0	595.2	595.4	
1.295	11.101	11.049	675.205	674.840	15695.5	15697.3	595.2	595.4	
1.665	11.101	11.049	675.201	674.830	15692.8	15694.7	595.2	595.4	
2.035	11.101	11.049	675.197	674.830	15690.2	15692.0	595.2	595.4	
2.405	11.101	11.049	675.193	674.830	15687.5	15689.4	595.2	595.4	
2.775	11.101	11.049	675.188	674.820	15684.9	15686.8	595.2	595.4	
3.145	11.102	11.049	675.184	674.820	15682.3	15684.1	595.2	595.4	
3.515	11.102	11.048	675.180	674.810	15679.6	15681.5	595.2	595.4	
<b>Number: 225 - Type: steam generator</b>									
Secod. OUTLET TEMP(K)		POWER (W)		Prim. OUTLET DENSITY(kg/m <sup>3</sup> )		Prim. OUTLET PRESSURE(kPa)		Prim. OUTLET TEMP(K)	
LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP	LOOP-I	RELAP

551.624	551.162	734083511	703796300	746.633	740.67	15532.0	15546.9	562.9	566.1
---------	---------	-----------	-----------	---------	--------	---------	---------	-------	-------

با توجه به جدول شماره ۶ که در آن پارامترهای هیدرولیکی محاسبه شده و نتایج کد RELAP5 در مسأله چهار مدار نیروگاه بوشهر ارائه شده است می‌توان گفت که تطابق خوبی بین نتایج کد مدار ۲ و کد RELAP5 حاصل شده است. در جدول شماره ۷ پارامترهای حرارتی محاسبه شده در سازه‌های حرارتی (در این مسأله میله‌های سوخت) آورده شده است.

جدول شماره ۷: توزیع دمای محاسبه شده در سازه‌های حرارتی مسأله چهار مدار و نتایج کد RELAP5

Number: 1218				Type: channel 218 heat structure						
TEMPERATURE (K)										
	Level 1		Level 2		Level 3		Level 4		Level 5	
Radius(m)	LOOP-I	RELAP5	LOOP-I	RELAP5	LOOP-I	RELAP5	LOOP-I	RELAP5	LOOP-I	RELAP5
0.00075	980.0	980.9	1396.9	1398.8	1639.4	1642.1	1737.9	1740.9	1722.6	1725.8
0.000902	979.1	980.0	1394.7	1396.7	1636.4	1639.1	1734.6	1737.6	1719.4	1722.5
0.001053	976.6	977.6	1388.7	1390.7	1628.2	1630.9	1725.5	1728.5	1710.4	1713.6
0.001205	972.7	973.7	1379.4	1381.3	1615.3	1618.0	1711.2	1714.2	1696.4	1699.6
0.001357	967.5	968.5	1367.0	1368.9	1598.2	1600.9	1692.2	1695.2	1677.9	1681.0
0.001509	961.2	962.2	1351.8	1353.7	1577.3	1579.9	1669.0	1672.0	1655.1	1658.2
0.001661	953.7	954.7	1334.0	1335.9	1552.8	1555.4	1641.8	1644.7	1628.4	1631.5

0.001812	945.2	946.2	1313.7	1315.6	1525.0	1527.6	1610.9	1613.8	1598.1	1601.2
0.001964	935.7	936.7	1291.23	1293.1	1494.1	1496.6	1576.6	1579.5	1564.5	1567.5
0.002116	925.2	926.2	1266.62	1268.5	1460.3	1462.8	1539.1	1541.9	1527.7	1530.7
0.002267	913.9	914.8	1240.1	1241.9	1423.9	1426.4	1498.6	1501.5	1488.1	1491.0
0.002419	901.6	902.6	1211.7	1213.5	1385.1	1387.6	1455.6	1458.3	1445.8	1448.7
0.002571	888.6	889.5	1181.6	1183.5	1344.2	1346.6	1410.1	1412.8	1401.2	1404.1
0.002723	874.7	875.7	1150.1	1151.9	1301.3	1303.7	1362.5	1365.2	1354.6	1357.4
0.002875	860.2	861.1	1117.1	1118.9	1256.7	1259.1	1313.1	1315.7	1306.1	1308.9
0.003026	844.9	845.9	1083.0	1084.7	1210.6	1212.9	1262.1	1264.7	1256.1	1258.8
0.003178	829.0	829.9	1047.7	1049.5	1163.3	1165.6	1209.9	1212.4	1204.7	1207.4
0.00333	812.4	813.4	1011.5	1013.3	1115.1	1117.3	1156.6	1159.1	1152.4	1155.0
0.003482	795.3	796.3	974.6	976.3	1066.0	1068.2	1102.6	1105.1	1099.4	1101.9
0.003633	777.7	778.7	937.0	938.7	1016.5	1018.6	1048.2	1050.5	1045.9	1048.3
0.003785	759.5	760.5	898.9	900.5	966.6	968.67	993.6	995.85	992.1	994.48
0.003828	681.1	682.2	770.0	771.8	815.1	817.44	834.3	836.94	835.1	837.86
0.00387	596.7	597.8	625.3	627.3	642.4	645.12	652.1	655.11	655.9	659.11
0.00421	586.6	587.8	607.2	609.3	620.4	623.18	628.7	631.78	633.0	636.19
0.00455	577.3	578.4	590.4	592.5	599.9	602.64	606.8	609.93	611.4	614.72
<b>Number: 1218</b>					<b>Type: channel 218 heat structure</b>					

Radius(m)	Level 6		Level 7		Level 8		Level 9		Level 10	
	LOOP-I	RELAP5	LOOP-I	RELAP5	LOOP-I	RELAP5	LOOP-I	RELAP5	LOOP-I	RELAP5
0.00075	1635.3	1638.5	1519.8	1522.9	1342.1	1344.8	1114.9	1116.9	847.5	848.7
0.000902	1632.4	1635.6	1517.3	1520.4	1340.1	1342.9	1113.7	1115.7	847.0	848.2
0.001053	1624.3	1627.5	1510.3	1513.4	1334.8	1337.6	1110.3	1112.4	845.6	846.7
0.001205	1611.6	1614.8	1499.4	1502.5	1326.5	1329.3	1105.1	1107.2	843.5	844.7
0.001357	1594.8	1598.0	1485.0	1488.0	1315.5	1318.2	1098.2	1100.2	840.7	841.9
0.001509	1574.3	1577.4	1467.2	1470.3	1302.1	1304.7	1089.7	1091.7	837.2	838.4
0.001661	1550.2	1553.3	1446.5	1449.5	1286.2	1288.9	1079.7	1081.7	833.1	834.3
0.001812	1522.8	1525.9	1422.9	1425.9	1268.3	1270.9	1068.3	1070.3	828.4	829.6
0.001964	1492.4	1495.5	1396.7	1399.7	1248.3	1250.9	1055.6	1057.6	823.1	824.3
0.002116	1459.2	1462.3	1368.1	1371.0	1226.4	1229.0	1041.7	1043.7	817.3	818.5
0.002267	1423.4	1426.4	1337.2	1340.1	1202.7	1205.3	1026.5	1028.5	811.0	812.2
0.002419	1385.2	1388.2	1304.2	1307.1	1177.4	1179.9	1010.3	1012.3	804.1	805.3
0.002571	1344.9	1347.8	1269.4	1272.2	1150.5	1153.0	993.0	995.0	796.8	798.0
0.002723	1302.7	1305.5	1232.8	1235.6	1122.3	1124.7	974.7	976.7	789.0	790.2
0.002875	1258.7	1261.6	1194.7	1197.4	1092.7	1095.2	955.5	957.4	780.7	781.9
0.003026	1213.3	1216.1	1155.2	1157.9	1062.0	1064.4	935.4	937.4	772.0	773.2

0.003178	1166.7	1169.4	1114.6	1117.2	1030.3	1032.7	914.6	916.5	762.9	764.1
0.00333	1119.0	1121.7	1072.9	1075.5	997.7	1000.0	893.0	894.8	753.3	754.5
0.003482	1070.6	1073.2	1030.5	1033.1	964.2	966.5	870.7	872.5	743.4	744.6
0.003633	1021.6	1024.2	987.5	990.0	930.1	932.4	847.8	849.6	733.1	734.3
0.003785	972.3	974.79	944.0	946.4	895.5	897.7	824.3	826.1	722.4	723.6
0.003828	824.1	826.8	807.4	810.1	778.0	780.4	734.5	736.5	673.2	674.4
0.00387	655.9	659.1	653.9	657.0	647.8	650.5	637.4	639.5	621.8	623.1
0.00421	634.5	637.7	634.5	637.6	631.6	634.3	625.5	627.7	615.8	617.1
0.00455	614.4	617.7	616.4	619.6	616.5	619.2	614.5	616.7	610.1	611.5
<b>Number: 1219</b>					<b>Type: channel 219 heat structure</b>					
<b>TEMPERATURE (K)</b>										
	<b>Level 1</b>		<b>Level 2</b>		<b>Level 3</b>		<b>Level 4</b>		<b>Level 5</b>	
Radius(m)	LOOP-I	RELAP5	LOOP-I	RELAP5	LOOP-I	RELAP5	LOOP-I	RELAP5	LOOP-I	RELAP5
0.00075	932.9	933.9	1295.8	1297.6	1505.6	1508.2	1591.2	1594.2	1578.2	1581.4
0.000902	932.2	933.2	1293.9	1295.8	1503.1	1505.7	1588.4	1591.4	1575.5	1578.6
0.001053	930.1	931.0	1288.9	1290.7	1496.1	1498.7	1580.7	1583.6	1567.9	1571.0
0.001205	926.7	927.7	1280.9	1282.8	1485.2	1487.8	1568.6	1571.5	1556.0	1559.1
0.001357	922.2	923.2	1270.4	1272.3	1470.8	1473.3	1552.5	1555.4	1540.2	1543.3
0.001509	916.8	917.7	1257.5	1259.4	1453.1	1455.6	1532.8	1535.7	1520.9	1524.0

0.001661	910.3	911.3	1242.4	1244.3	1432.3	1434.8	1509.7	1512.6	1498.3	1501.4
0.001812	903.0	903.9	1225.3	1227.1	1408.8	1411.3	1483.5	1486.4	1472.7	1475.7
0.001964	894.7	895.7	1206.1	1208.0	1382.6	1385.0	1454.4	1457.3	1444.1	1447.1
0.002116	885.7	886.6	1185.2	1187.0	1354.0	1356.4	1422.7	1425.5	1413.0	1416.0
0.002267	875.8	876.8	1162.6	1164.4	1323.1	1325.5	1388.4	1391.2	1379.4	1382.3
0.002419	865.2	866.2	1138.4	1140.2	1290.2	1292.6	1351.8	1354.6	1343.6	1346.4
0.002571	853.9	854.8	1112.7	1114.5	1255.4	1257.7	1313.2	1315.9	1305.7	1308.5
0.002723	841.8	842.8	1085.7	1087.5	1218.9	1221.2	1272.8	1275.4	1266.0	1268.8
0.002875	829.2	830.1	1057.5	1059.2	1180.8	1183.1	1230.7	1233.3	1224.7	1227.4
0.003026	815.9	816.8	1028.1	1029.8	1141.5	1143.7	1187.2	1189.8	1182.0	1184.7
0.003178	802.0	802.9	997.8	999.4	1100.9	1103.2	1142.5	1145.0	1138.1	1140.7
0.00333	787.5	788.5	966.5	968.2	1059.45	1061.6	1096.9	1099.3	1093.1	1095.8
0.003482	772.5	773.5	934.5	936.2	1017.18	1019.3	1050.3	1052.7	1047.5	1050.0
0.003633	757.0	758.0	901.9	903.5	974.3	976.4	1003.3	1005.6	1001.2	1003.7
0.003785	741.1	742.1	868.7	870.3	931.0	933.0	955.9	958.1	954.6	957.0
0.003828	669.7	670.7	750.6	752.4	791.9	794.1	809.5	812.1	810.3	813.0
0.00387	593.4	594.5	619.1	621.1	634.6	637.2	643.4	646.3	646.9	650.0
0.00421	584.3	585.4	602.8	604.9	614.8	617.4	622.3	625.3	626.2	629.4
0.00455	575.9	577.0	587.7	589.7	596.3	599.0	602.6	605.6	606.9	610.0

Number: 1219					Type: channel 219 heat structure					
TEMPERATURE (K)										
Radius(m)	Level 6		Level 7		Level 8		Level 9		Level 10	
	LOOP-I	RELAP5	LOOP-I	RELAP5	LOOP-I	RELAP5	LOOP-I	RELAP5	LOOP-I	RELAP5
0.00075	1502.8	1505.9	1403.1	1406.2	1249.5	1252.2	1052.2	1054.2	817.3	818.6
0.000902	1500.3	1503.4	1401.0	1404.0	1247.9	1250.6	1051.1	1053.2	816.9	818.2
0.001053	1493.5	1496.6	1395.1	1398.1	1243.4	1246.1	1048.3	1050.3	815.7	817.0
0.001205	1482.8	1485.9	1385.9	1388.9	1236.4	1239.0	1043.8	1045.9	813.9	815.2
0.001357	1468.5	1471.6	1373.6	1376.6	1227.0	1229.7	1037.9	1039.9	811.4	812.7
0.001509	1451.1	1454.2	1358.6	1361.6	1215.6	1218.2	1030.6	1032.6	808.4	809.7
0.001661	1430.7	1433.8	1341.1	1344.0	1202.1	1204.7	1022.0	1024.1	804.8	806.1
0.001812	1407.5	1410.6	1321.1	1324.0	1186.8	1189.4	1012.3	1014.3	800.7	802.0
0.001964	1381.8	1384.8	1298.9	1301.8	1169.8	1172.4	1001.3	1003.4	796.1	797.4
0.002116	1353.6	1356.6	1274.6	1277.4	1151.1	1153.7	989.4	991.4	791.0	792.3
0.002267	1323.3	1326.2	1248.3	1251.2	1130.9	1133.5	976.3	978.3	785.5	786.8
0.002419	1290.9	1293.7	1220.3	1223.1	1109.3	1111.8	962.3	964.3	779.5	780.8
0.002571	1256.6	1259.4	1190.6	1193.3	1086.3	1088.8	947.4	949.4	773.0	774.4
0.002723	1220.6	1223.4	1159.3	1162.1	1062.1	1064.5	931.6	933.6	766.2	767.5
0.002875	1183.1	1185.8	1126.7	1129.4	1036.7	1039.1	915.0	917.0	759.0	760.3



0.003026	1144.3	1147.0	1092.9	1095.6	1010.3	1012.7	897.6	899.5	751.3	752.6
0.003178	1104.3	1106.9	1058.0	1060.6	982.9	985.3	879.4	881.4	743.3	744.6
0.00333	1063.3	1065.9	1022.2	1024.7	954.7	957.0	860.6	862.5	734.9	736.2
0.003482	1021.6	1024.1	985.5	988.0	925.7	928.0	841.2	843.1	726.2	727.5
0.003633	979.2	981.7	948.2	950.7	896.1	898.4	821.2	823.1	717.1	718.4
0.003785	936.4	938.8	910.4	912.8	865.9	868.1	800.7	802.5	707.7	709.0
0.003828	800.2	802.9	785.1	787.7	758.3	760.7	718.7	720.7	662.9	664.3
0.00387	647.0	650.1	645.3	648.3	639.9	642.6	630.5	632.7	616.5	617.9
0.00421	627.7	630.8	627.8	630.9	625.3	628.0	619.9	622.0	611.0	612.5
0.00455	609.6	612.8	611.5	614.6	611.6	614.4	609.9	612.1	606.0	607.4
<b>Number: 1220</b>					<b>Type: channel 220 heat structure</b>					
<b>TEMPERATURE (K)</b>										
	<b>Level 1</b>		<b>Level 2</b>		<b>Level 3</b>		<b>Level 4</b>		<b>Level 5</b>	
Radius(m)	LOOP-I	RELAP5	LOOP-I	RELAP5	LOOP-I	RELAP5	LOOP-I	RELAP5	LOOP-I	RELAP5
0.00075	833.4	833.9	1086.8	1087.8	1230.2	1231.6	1288.7	1290.2	1280.3	1281.9
0.000902	832.8	833.4	1085.6	1086.6	1228.6	1229.9	1286.9	1288.5	1278.5	1280.1
0.001053	831.4	831.9	1082.3	1083.3	1224.1	1225.5	1281.9	1283.5	1273.7	1275.3
0.001205	829.1	829.6	1077.1	1078.2	1217.1	1218.5	1274.2	1275.7	1266.0	1267.6
0.001357	826.0	826.6	1070.3	1071.3	1207.8	1209.2	1263.8	1265.4	1255.9	1257.5

0.001509	822.3	822.8	1061.9	1062.9	1196.4	1197.8	1251.2	1252.8	1243.5	1245.1
0.001661	817.9	818.4	1052.0	1053.0	1183.1	1184.4	1236.4	1237.9	1229.0	1230.6
0.001812	812.8	813.3	1040.7	1041.7	1167.8	1169.2	1219.5	1221.1	1212.5	1214.0
0.001964	807.1	807.7	1028.2	1029.2	1150.9	1152.2	1200.8	1202.3	1194.1	1195.6
0.002116	800.9	801.4	1014.4	1015.4	1132.4	1133.7	1180.2	1181.8	1173.9	1175.5
0.002267	794.1	794.6	999.4	1000.4	1112.3	1113.6	1158.0	1159.6	1152.1	1153.7
0.002419	786.7	787.3	983.4	984.4	1090.8	1092.1	1134.3	1135.8	1128.8	1130.4
0.002571	778.9	779.4	966.3	967.3	1067.9	1069.2	1109.1	1110.6	1104.1	1105.6
0.002723	770.5	771.1	948.2	949.2	1043.9	1045.2	1082.6	1084.0	1078.0	1079.6
0.002875	761.6	762.2	929.2	930.2	1018.7	1020.0	1054.8	1056.3	1050.8	1052.3
0.003026	752.3	752.9	909.4	910.4	992.5	993.7	1026.0	1027.4	1022.4	1023.9
0.003178	742.6	743.1	888.8	889.8	965.3	966.6	996.1	997.6	993.1	994.6
0.00333	732.4	733.0	867.4	868.4	937.3	938.6	965.4	966.8	962.9	964.4
0.003482	721.8	722.4	845.4	846.4	908.5	909.8	933.9	935.3	931.9	933.4
0.003633	710.8	711.4	822.8	823.8	879.1	880.4	901.8	903.2	900.3	901.8
0.003785	699.4	700.0	799.7	800.7	849.2	850.5	869.1	870.5	868.2	869.6
0.003828	644.2	644.9	706.8	707.9	739.1	740.4	753.0	754.5	753.7	755.3
0.00387	586.1	586.8	605.4	606.6	617.2	618.8	624.0	625.7	626.8	628.6
0.00421	579.3	580.0	593.2	594.4	602.3	603.8	608.0	609.8	611.2	612.9

0.00455	573.0	573.7	581.8	583.0	588.3	589.9	593.2	594.9	596.5	598.3
Number: 1220					Type: channel 220 heat structure					
TEMPERATURE (K)										
	Level 6		Level 7		Level 8		Level 9		Level 10	
Radius(m)	LOOP-I	RELAP5	LOOP-I	RELAP5	LOOP-I	RELAP5	LOOP-I	RELAP5	LOOP-I	RELAP5
0.00075	1229.5	1231.0	1162.0	1163.4	1057.0	1058.1	919.7	920.5	751.9	752.4
0.000902	1227.9	1229.4	1160.6	1162.0	1055.9	1057.0	919.0	919.8	751.6	752.1
0.001053	1223.5	1225.0	1156.8	1158.2	1052.9	1054.1	917.0	917.9	750.8	751.2
0.001205	1216.6	1218.1	1150.8	1152.2	1048.3	1049.5	914.0	914.9	749.5	749.9
0.001357	1207.5	1209.0	1142.9	1144.3	1042.2	1043.4	910.1	910.9	747.8	748.2
0.001509	1196.2	1197.8	1133.2	1134.6	1034.7	1035.8	905.1	906.0	745.7	746.1
0.001661	1183.1	1184.6	1121.8	1123.2	1025.8	1027.0	899.4	900.2	743.1	743.6
0.001812	1168.1	1169.6	1108.8	1110.2	1015.7	1016.9	892.8	893.7	740.3	740.7
0.001964	1151.4	1152.9	1094.3	1095.7	1004.5	1005.6	885.4	886.3	737.0	737.4
0.002116	1133.2	1134.6	1078.4	1079.8	992.1	993.3	877.3	878.1	733.4	733.9
0.002267	1113.4	1114.9	1061.2	1062.6	978.7	979.8	868.4	869.3	729.5	730.0
0.002419	1092.2	1093.7	1042.8	1044.1	964.3	965.4	858.9	859.8	725.3	725.7
0.002571	1069.7	1071.1	1023.1	1024.5	948.9	950.0	848.7	849.6	720.8	721.2
0.002723	1046.0	1047.4	1002.4	1003.8	932.6	933.7	837.8	838.7	715.9	716.4

0.002875	1021.1	1022.6	980.7	982.0	915.5	916.6	826.4	827.3	710.8	711.2
0.003026	995.3	996.7	958.0	959.3	897.6	898.7	814.4	815.3	705.4	705.8
0.003178	968.5	969.9	934.5	935.8	878.9	880.0	801.8	802.7	699.6	700.1
0.00333	940.8	942.2	910.1	911.4	859.6	860.7	788.7	789.6	693.7	694.1
0.003482	912.4	913.8	885.1	886.4	839.6	840.7	775.1	776.1	687.4	687.9
0.003633	883.4	884.8	859.4	860.7	819.1	820.2	761.1	762.0	680.9	681.4
0.003785	853.8	855.2	833.2	834.5	798.0	799.1	746.6	747.5	674.1	674.6
0.003828	745.9	747.4	734.2	735.6	713.3	714.5	682.6	683.6	639.7	640.2
0.00387	627.0	628.7	625.9	627.4	621.9	623.2	614.9	615.8	604.3	604.8
0.00421	612.4	614.1	612.6	614.2	610.8	612.2	606.8	607.8	600.1	600.6
0.00455	598.8	600.5	600.3	601.9	600.6	601.9	599.3	600.3	596.3	596.8

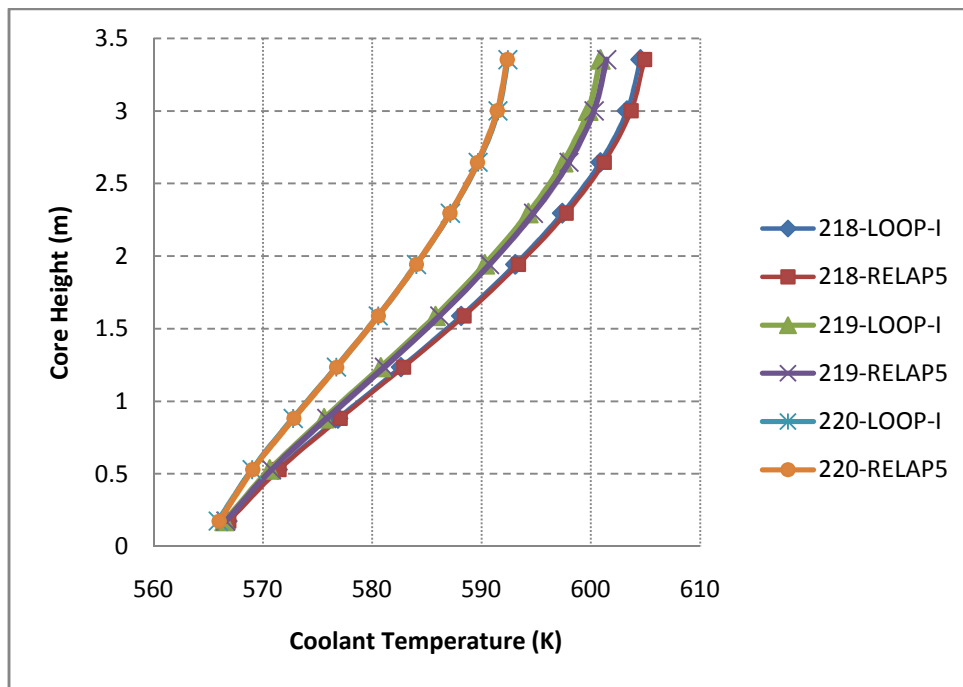
با توجه به جدول شماره ۷ نتایج محاسبه شده همخوانی خوبی با نتایج حاصل از کد RELAP5 دارد.

جدول شماره ۸ مقایسه نتایج محاسبات و مقادیر ارائه شده در گزارش نهایی تحلیل ایمنی نیروگاه بوشهر آمده است.

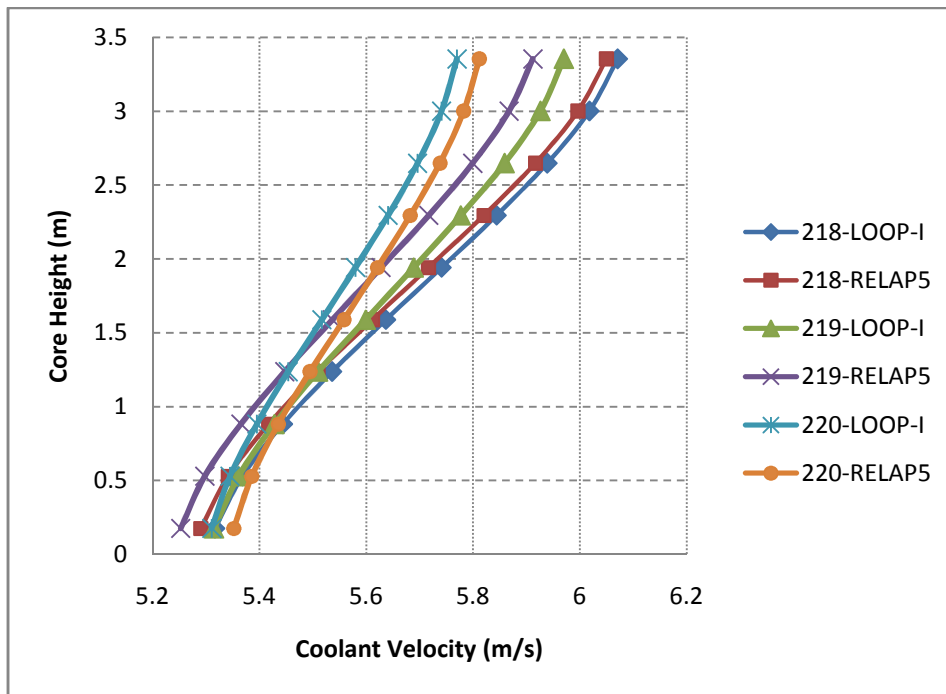
جدول شماره ۸: مقایسه پارامترهای ارائه شده در گزارش نهایی تحلیل ایمنی نیروگاه بوشهر با مقادیر محاسبه شده

Parameter	Unit	FSAR	RELAP5	LOOP-I	RELAP Err. (%)	LOOP-I Err. (%)
Nominal core outlet pressure	MPa	15.7	15.7931	15.7904	0.59	0.57
Coolant temperature at core inlet	°C	291	291.15	291.04	0.05	0.01
Coolant average temperature at reactor outlet	°C	321	322.28	322.17	0.4	0.36
Coolant enthalpy at the reactor inlet	kJ/kg	1290	-	1289.5	-	0.04
Coolant enthalpy at the reactor outlet	kJ/kg	1460	-	1465.8	-	0.4
Coolant density at the reactor inlet	kg/m <sup>3</sup>	743	744.77	744.97	0.24	0.26
Coolant density at the reactor outlet	kg/m <sup>3</sup>	675	674.98	675.18	0.002	0.026
Average coolant velocity at the core inlet	m/s	5.6	5.32	5.30	5.3	5.3

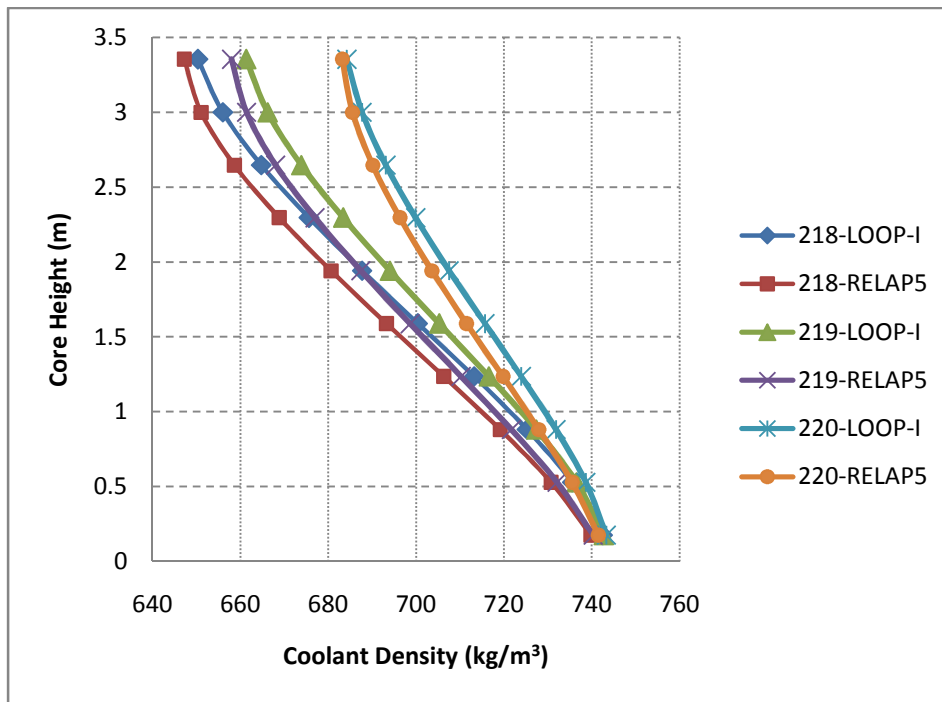
با توجه به جدول فوق تطابق خوبی بین مقادیر محاسبه شده و مقادیر ارائه شده در گزارش نهایی تحلیل ایمنی نیروگاه بوشهر مشاهده می‌شود. در ادامه شکل‌های مربوط به نتایج حاصل از کد LOOP-I برای سه مسأله چهار، سه و دو مدار ارائه می‌شود.



شکل ۳۱: توزیع دمای سیال در طول کانال‌های قلب راکتور در مسأله چهار مدار

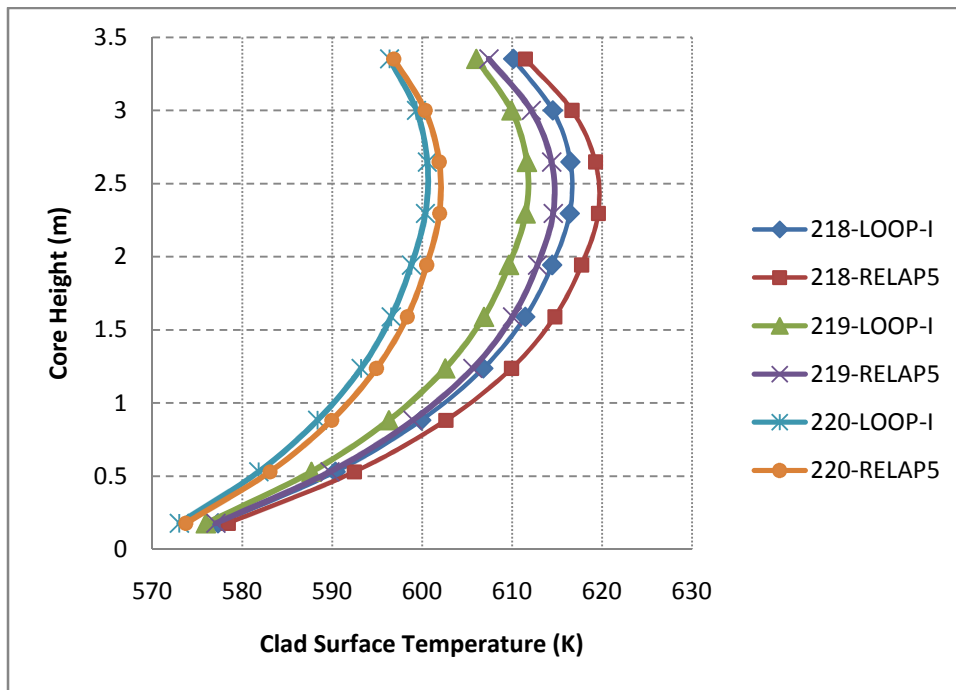


شکل ۳۲: توزیع سرعت سیال در طول کانال‌های قلب راکتور در مسأله چهار مدار

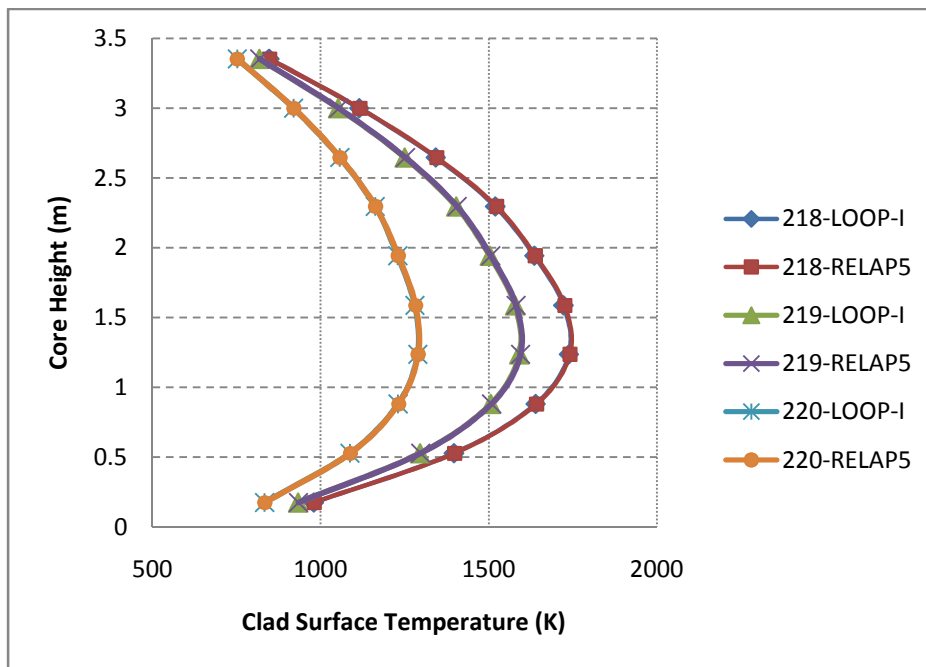


شکل ۳۳: توزیع چگالی در طول کانال‌های قلب راکتور در مسأله چهار مدار

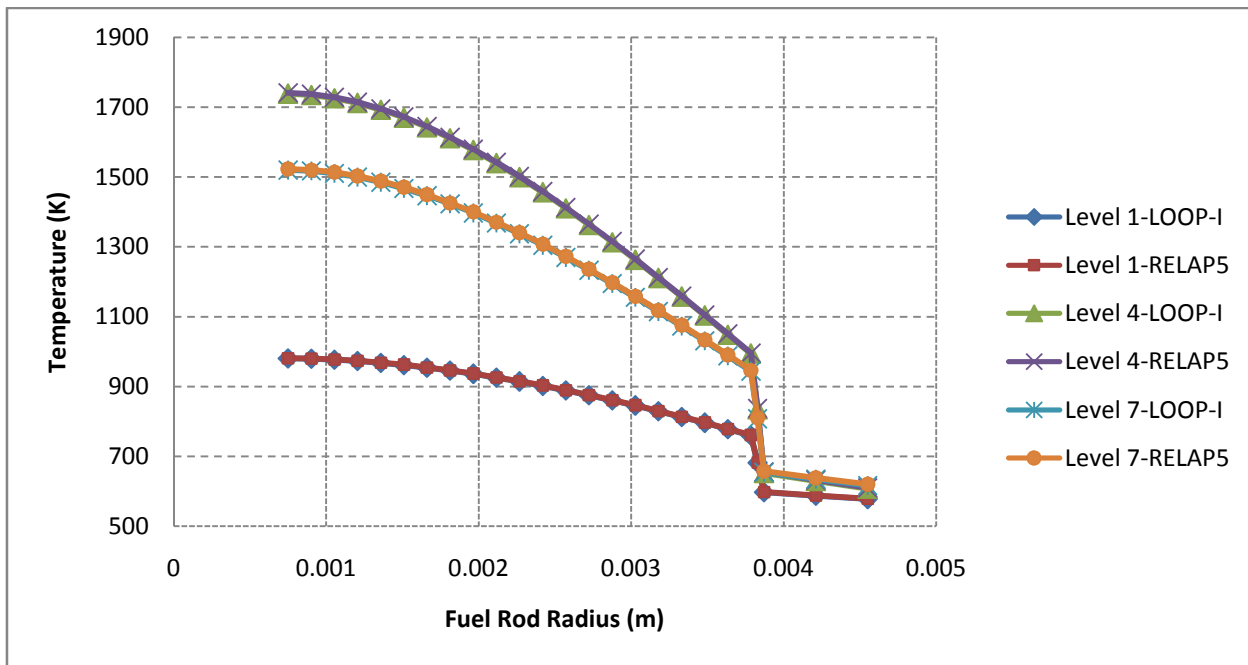




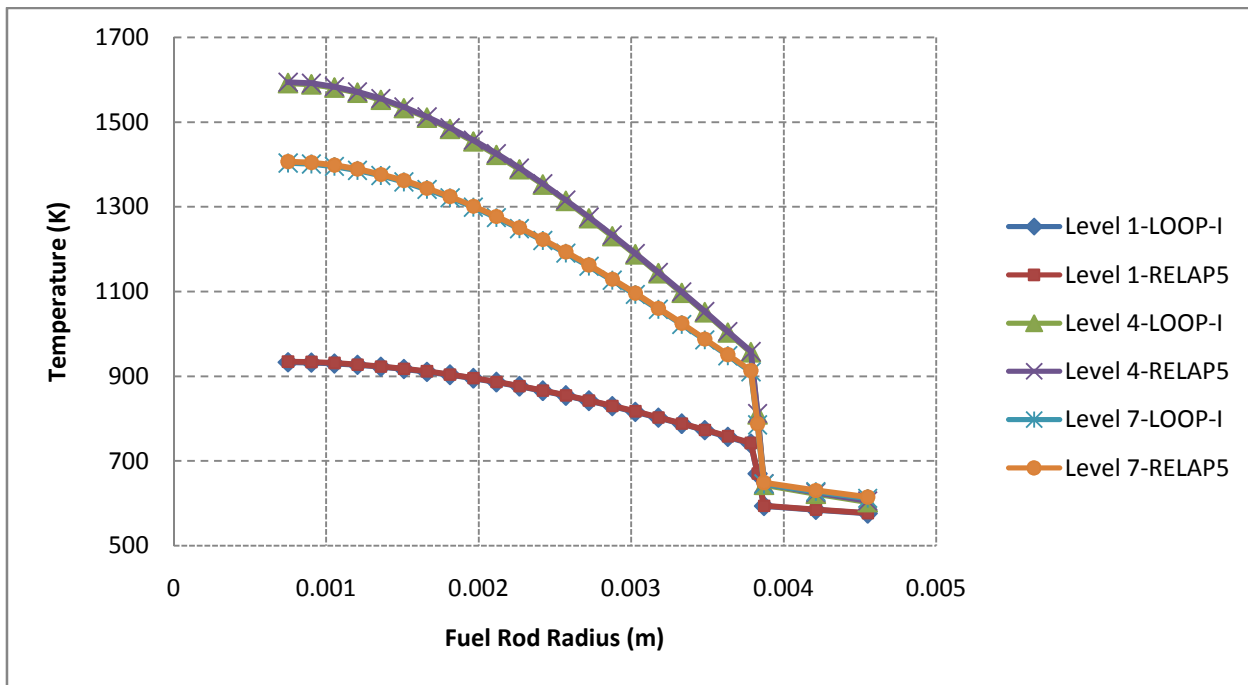
شکل ۳۴: دمای سطح غلاف در طول کانال‌های قلب راکتور در مسئله چهار مدار



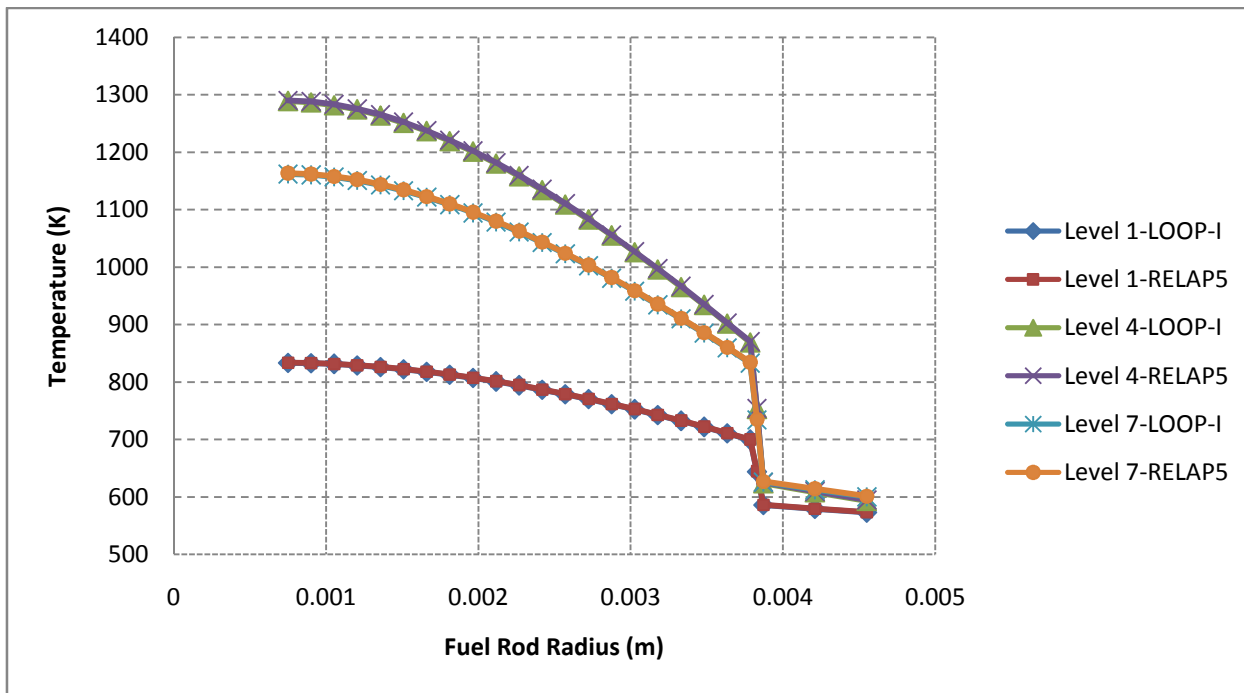
شکل ۳۵: توزیع دمای مرکز سوخت در طول کانال‌های قلب راکتور در مسأله چهار مدار



شکل ۳۶: توزیع دمای شعاعی در میله سوخت کانال ۲۱۸ در سه سطح در مسأله چهار مدار

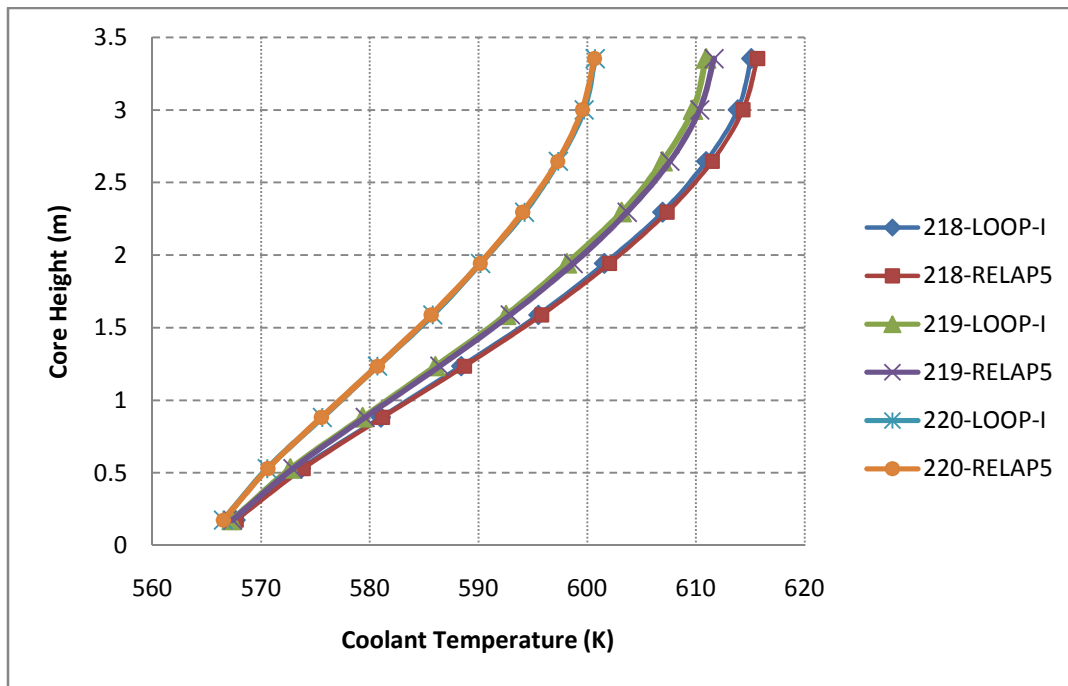


شکل ۳۷: توزیع دمای شعاعی در میله سوخت کانال ۲۱۹ در سه سطح در مسأله چهار مدار

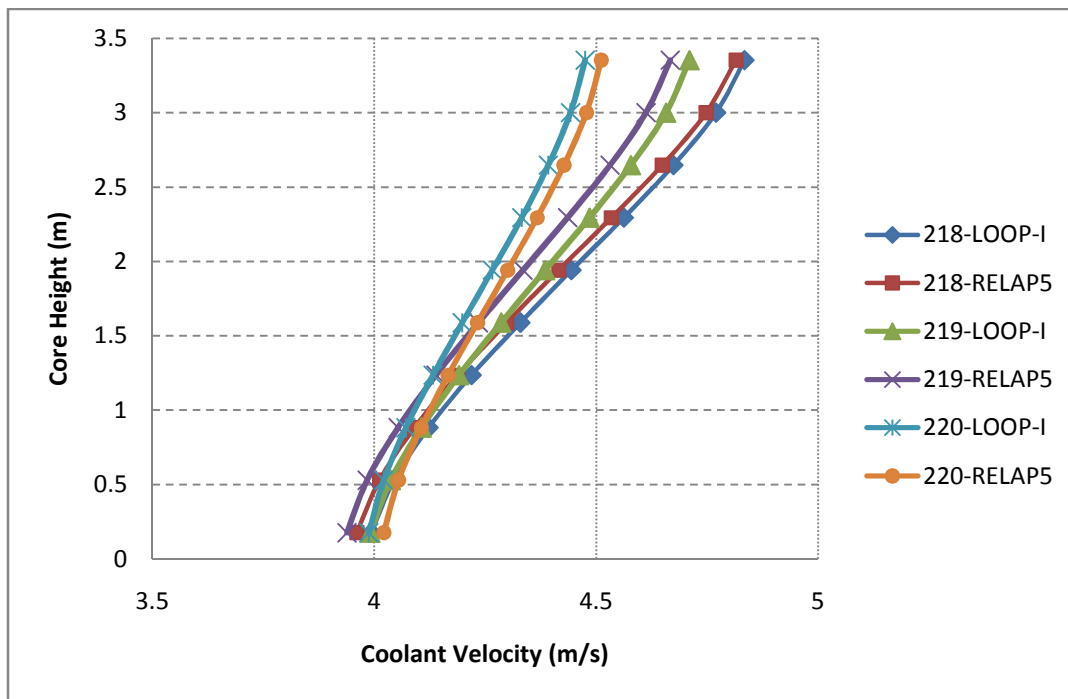


شکل ۳۸: توزیع دمای شعاعی در میله سوخت کانال ۲۲۰ در سه سطح در مسأله چهار مدار

همانطور که در شکل‌های فوق مشاهده می‌شود تطابق بسیار خوبی بین نتایج محاسبه شده توسط برنامه و نتایج کد RELAP5 برقرار است. برای مشاهده قابلیت کد در حالت دو فاز، به ترتیب یک و دو مدار از چهار مدار نیروگاه بوشهر از مسأله حذف شده‌اند. در حالت سه مدار شرایط سیال در قلب راکتور هنوز در شرایط مادون سرد است. این امر همانگونه که در گزارش نهایی تحلیل ایمنی اشاره شده است، نشان می‌دهد نیروگاه قابلیت ادامه فعالیت با سه مدار را داراست. در حالتی که تنها دو مدار از مدارهای نیروگاه بوشهر در حالت کار باشند جریان سیال در قلب راکتور دو فاز می‌شود. تأثیر دو فاز شدن در شکل‌های مربوط به این مسأله مشهود است.

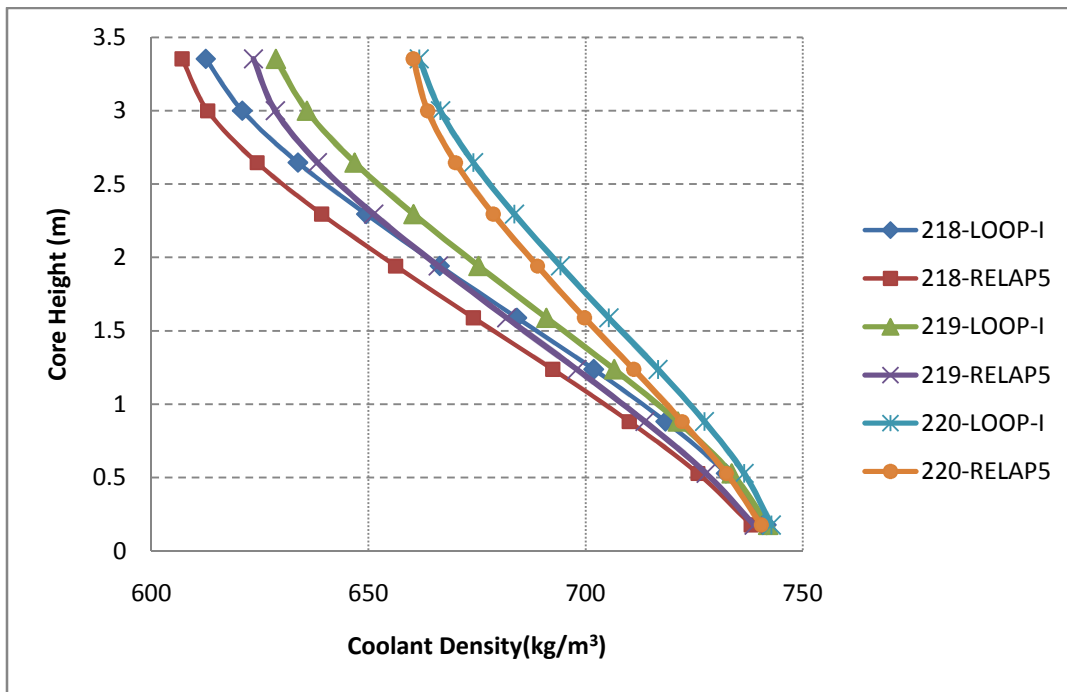


شکل ۳۹: توزیع دما در کانال‌های قلب راکتور در مسأله سه مدار



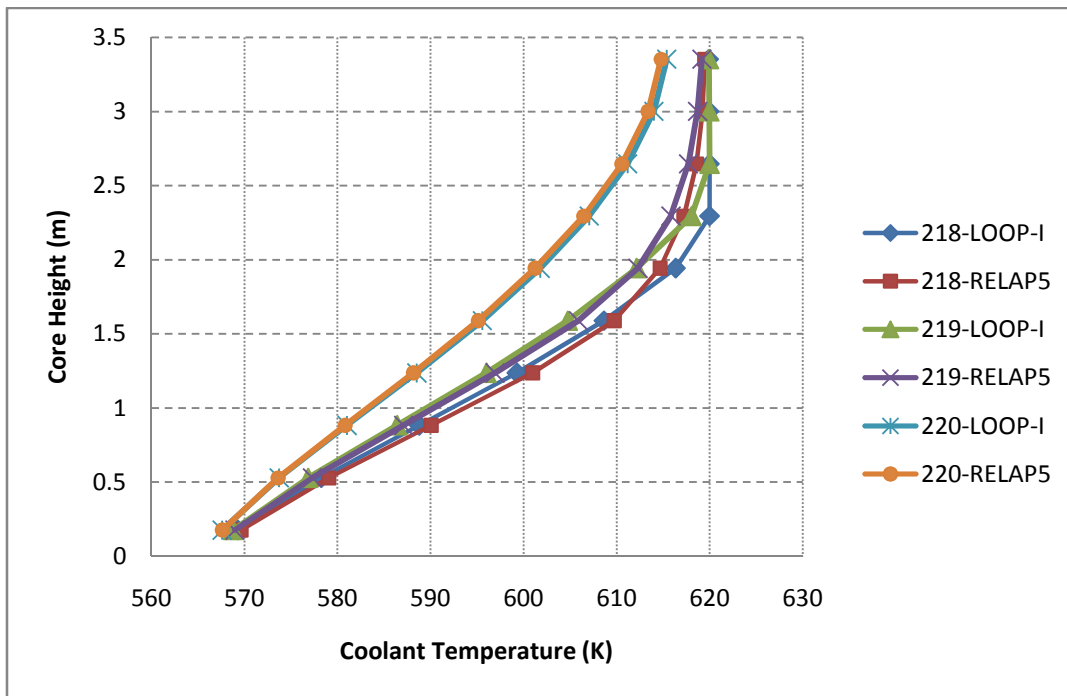
شکل ۴۰: توزیع سرعت سیال در کانال‌های قلب راکتور در مسأله سه مدار



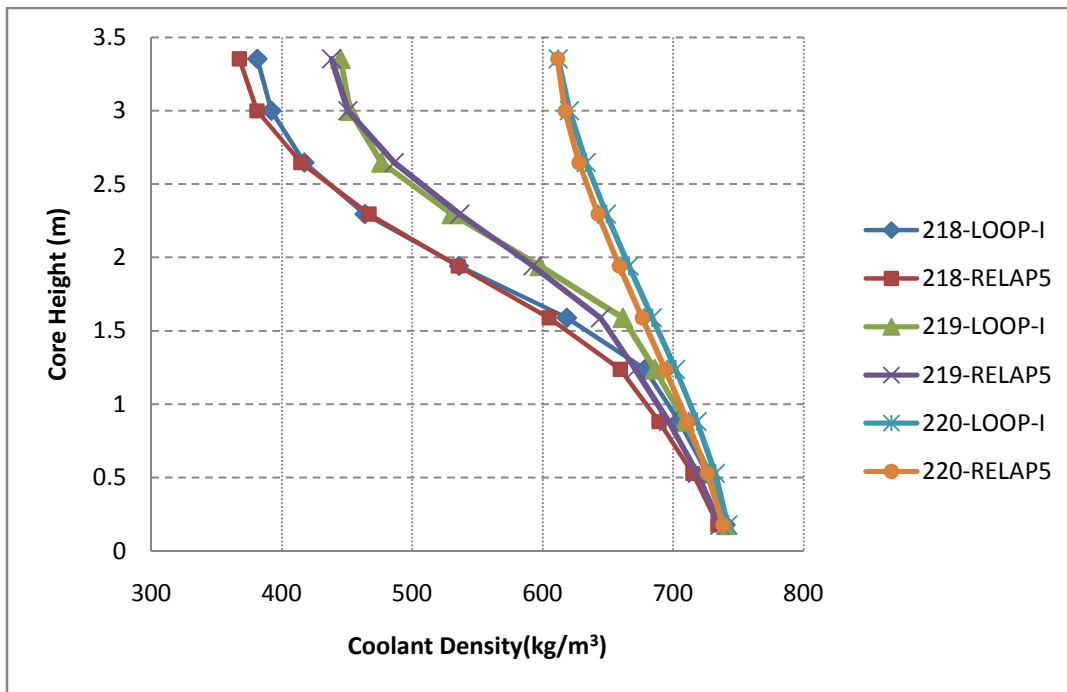


شکل ۴۱: توزیع چگالی در کانال‌های قلب راکتور در مسأله سه مدار

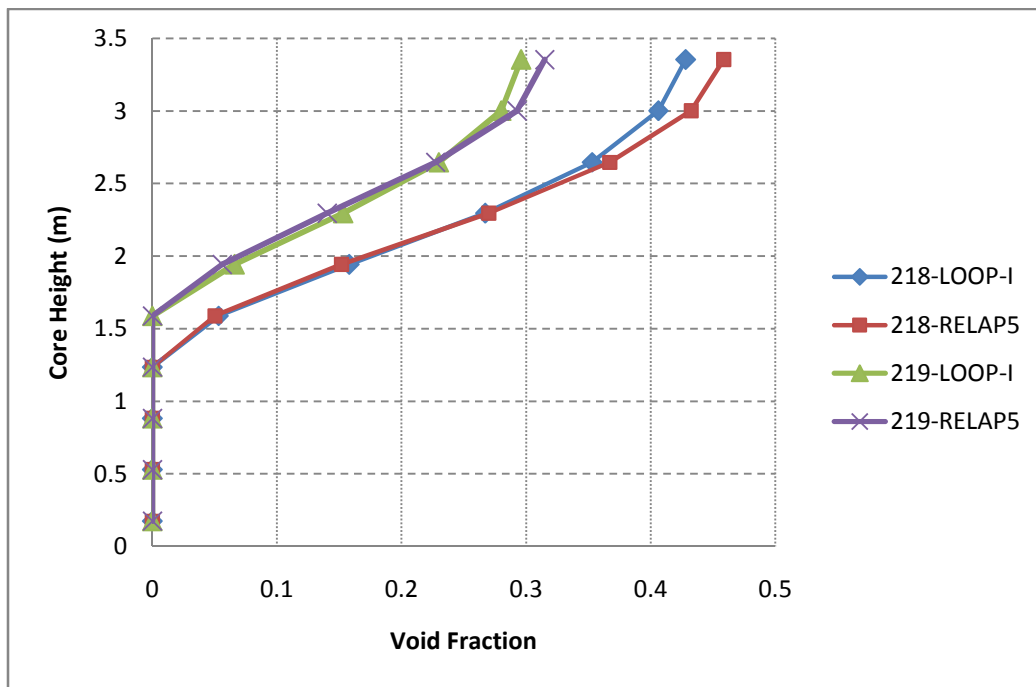
با توجه به شکل های مربوط به مسأله سه مدار فعال در نیروگاه بوشهر، مشاهده می شود سیال در هیچکدام از کانال های قلب راکتور دو فاز نمی شود و در شرایط مادون سرد باقی می ماند. تنها تفاوت نتایج این مسأله با مسأله حالت چهار مدار این است که دمای خروجی قلب راکتور حدود ۱۰ کلوین بالاتر است و توان حرارتی منتقل شده در مولد بخار افزایش می یابد. علت این افزایش این است که توان راکتور مانند قبل است ولی ۳ مولد بخار بایستی این توان را برداشت کند. در ادامه شکل های مربوط به نتایج مسأله دو مدار ارائه شده است.



شکل ۴۲: توزیع دمای سیال در کانال‌های قلب راکتور در مسأله دو مدار



شکل ۴۳: توزیع چگالی سیال در کانال‌های قلب راکتور در مسأله دو مدار



شکل ۴۴: توزیع کسر حجمی بخار در کانال‌های قلب راکتور در مسأله دو مدار

با توجه به شکل‌های ۴۱ تا ۴۳ مشاهده می‌شود که سیال در حالتی که تنها دو مدار از چهار مدار نیروگاه بوشهر فعال باشند، در دو کانال گرم و متوسط دو فاز می‌شود، به طوری که حداکثر کسر حجمی بخار در کانال گرم حدود ۰/۴۵ و در کانال متوسط حدود ۰/۳ است.

## ۱۰- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این بسته، نسخه اول کد LOOP بعنوان اولین بسته برای مدلسازی ترموهیدرولیکی مدار اولیه نیروگاه‌های هسته‌ای و راکتور تحقیقاتی در شرایط پایا تحت عنوان کد LOOP-I ارائه شد. برای بررسی صحت عملکرد برنامه نوشته شده، مسأله‌ای شامل همه اجزای مدار مدلسازی و نتایج آن با کد RELAP5 مقایسه شد. با توجه به تفاوت مدل‌های برنامه و کد RELAP5 مشاهده شد که نتایج حاصل تطابق خوبی با یکدیگر دارند و برنامه نوشته شده برای مدلسازی مدار قابل استفاده می‌باشد. در بسته نرم‌افزاری آتی از همین سری (LOOP-II)، مدلسازی مدار در شرایط گذرا ارائه خواهد شد.

## ۱۱- مراجع

1. John G. Collier, John R. Thom. "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. Ishii, M., Hibiki, T., "Thermo-fluid Dynamics of Two-phase Flow". Springer, 2006.
6. "Thermophysical Properties of Materials for Water Cooled Reactors", IAEA-TECDOC-949, 1997.
7. F. M. White. "Fluid Mechanics", McGraw-Hill, 4<sup>th</sup> Edition.
8. Sadik Kakac, Hongton Liu., "Heat Exchangers Selection, Rating and Thermal Design", CRC Press, 2<sup>nd</sup> Edition, Florida, 2002.
9. Final Safety Analysis Report (FSAR), Chapter 4, Reactor, Atomic Energy Organization of IRAN, 2003.