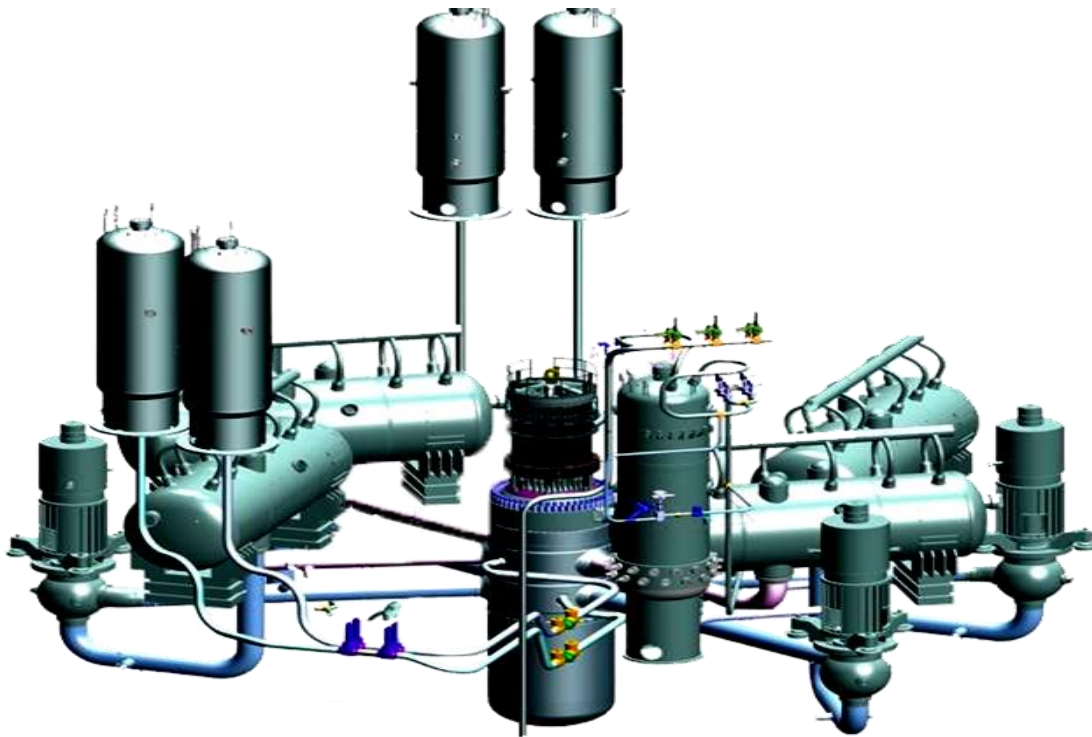


کد تحلیل مدار ترموهیدرولیکی در نیروگاه‌های هسته‌ای آب سبک در حالت گذرا THERMOHYDRAULIC LWR LOOP ANALYSIS CODE FOR TRANSIENT CONDITIONS (LOOP2.0)



گزارش فنی کد LOOP2.0

ویرایش ۰ - شهریور ۱۳۹۸

فهرست مطالب

۷	۱- چکیده
۷	۲- کلیدواژه
۸	۳- اختصارات
۸	۴- مقدمه
۹	۵- دامنه گزارش
۹	۶- حل حالت گذرا
۱۰	۷- مدل کانال
۲۴	۸- مدل تک‌حجم
۲۵	۹- مدل اتصال
۳۳	۱۰- مدل پمپ
۴۱	۱۱- مدل انشعاب
۴۶	۱۲- مدل مولد بخار
۵۷	۱۳- قابلیت‌های کد
۵۸	۱۴- راستی‌آزمایی برنامه کامپیوتری
۹۳	۱۵- نتیجه‌گیری
۹۳	۱۶- مراجع

لیست شکل‌ها

- شکل ۱: روندنمای کلی برنامه مدار در حالت گذرا..... ۱۱
- شکل ۲: روندنمای حل برنامه کانال با مدل دوفاز همگن..... ۲۲
- شکل ۳: روندنمای حل برنامه کانال با مدل دوفاز شار رانشی..... ۲۳
- شکل ۴: روندنمای حل معادله رسانش حرارتی وابسته به زمان..... ۲۴
- شکل ۵: نمای برش طولی از یک شیر فلکه..... ۲۶
- شکل ۶: نمای برش طولی از یک شیر دریچه‌ای..... ۲۷
- شکل ۷: نمای برش طولی از یک شیر یک طرفه..... ۲۷
- شکل ۸: نمای برش طولی از یک شیر زاویه‌ای..... ۲۷
- شکل ۹: نمایی از زانویی ۹۰ درجه با شعاع انحنای بزرگ..... ۲۹
- شکل ۱۰: تغییرات ضریب افت فشار در زانویی با شعاع انحنای بزرگ..... ۲۹
- شکل ۱۱: تغییرات ضریب افت فشار برای انقباض و انبساط ناگهانی جریان برحسب نسبت قطرها..... ۳۰
- شکل ۱۲: تغییرات ضریب افت در دیفیوزر بر حسب زاویه مخروطی..... ۳۱
- شکل ۱۳: خروجی با لبه متداخل و ضریب افت فشار برحسب طول بخش متداخل به قطر..... ۳۲
- شکل ۱۴: خروجی با لبه زایه‌دار و لبه گرد شده و ضریب افت فشار..... ۳۲
- شکل ۱۵: روندنمای مدل اتصال..... ۳۳
- شکل ۱۶: منحنی هد چهار ناحیه‌ای برای پمپ‌های MOD1 (ANC-A-2083)..... ۳۶
- شکل ۱۷: منحنی چهار ناحیه‌ای گشتاور را برای پمپ‌های MOD1 (ANC-A-3449)..... ۳۷
- شکل ۱۸: منحنی متشابه هد بر اساس پارامترهای بی‌بعد..... ۳۸
- شکل ۱۹: منحنی متشابه گشتاور بر اساس پارامترهای بی‌بعد..... ۳۸
- شکل ۲۰: روندنمای مدل پمپ..... ۴۰
- شکل ۲۱: نمایی از یک انشعاب با یک ورودی و دو خروجی..... ۴۱
- شکل ۲۲: نمایی از راکتور فرضی با بخش پایینی، کانال‌های قلب و بخش بالایی..... ۴۲
- شکل ۲۳: روندنمای مدل انشعاب..... ۴۶
- شکل ۲۴: الگوی گردش جریان در پوسته یک مولد بخار..... ۴۸
- شکل ۲۵: فاصله افقی و عمودی بین لوله‌های مولد بخار..... ۴۹
- شکل ۲۶: حجم‌بندی دسته لوله‌ها در راستای عمودی (هر کانال یک حجم در بخش پوسته و لوله)..... ۵۲
- شکل ۲۷: حجم‌بندی دسته لوله‌ها در راستای افقی..... ۵۳
- شکل ۲۸: روندنمای کلی حل مدل مولد بخار..... ۵۴
- شکل ۲۹: روندنمای فرآیند مدل‌سازی مبدل حرارتی پوسته و لوله..... ۵۵
- شکل ۳۰: روندنمای فرآیند مدل‌سازی مبدل حرارتی پوسته و لوله بخش ۱..... ۵۶

- شکل ۳۱: روندنمای فرآیند مدل‌سازی مبدل حرارتی پوسته و لوله بخش ۲ ۵۷
- شکل ۳۲: حجم بندی اجزای مدارهای نیروگاه بوشهر ۵۹
- شکل ۳۳: نمایی از مقطع عرضی سوخت نیروگاه بوشهر بهمراه گره‌ها و بازه‌های محاسباتی ۶۲
- شکل ۳۴: تغییرات توان، دبی جرمی، فشار و دمای ورودی بصورت نرمال شده و تابعی از زمان ۷۲
- شکل ۳۵: تغییرات دمای حجم آغازین ۷۳
- شکل ۳۶: تغییرات دمای سیال در خروجی لوله شماره ۲۰۲ ۷۳
- شکل ۳۷: تغییرات دمای سیال در خروجی لوله شماره ۲۰۴ ۷۳
- شکل ۳۸: تغییرات دمای سیال در خروجی لوله شماره ۲۰۶ ۷۴
- شکل ۳۹: تغییرات دمای سیال در خروجی پمپ شماره ۲۰۷ ۷۴
- شکل ۴۰: تغییرات دمای سیال در خروجی لوله شماره ۲۰۸ ۷۴
- شکل ۴۱: تغییرات دمای سیال در خروجی لوله شماره ۲۱۰ ۷۵
- شکل ۴۲: تغییرات دمای سیال در خروجی لوله شماره ۲۱۲ ۷۵
- شکل ۴۳: تغییرات دمای سیال در خروجی لوله شماره ۲۱۴ ۷۵
- شکل ۴۴: تغییرات دمای سیال در انشعاب شماره ۲۱۵ (بخش پایین قلب راکتور) ۷۶
- شکل ۴۵: لختی انتقال تغییرات در دمای سیال در اجزای پیش از قلب حاصل از کد RELAP5 ۷۶
- شکل ۴۶: لختی انتقال تغییرات در دمای سیال در اجزای پیش از قلب در مدل همگن کد LOOP2.0 ۷۶
- شکل ۴۷: لختی انتقال تغییرات در دمای سیال در اجزای پیش از قلب در مدل شار رانشی کد LOOP2.0 ۷۷
- شکل ۴۸: تغییرات دمای سیال در خروجی کانال شماره ۲۱۶ (کانال کنارگذر قلب) ۷۷
- شکل ۴۹: تغییرات دمای سیال در خروجی کانال شماره ۲۱۸ (کانال داغ قلب) ۷۷
- شکل ۵۰: تغییرات دمای سیال در خروجی کانال شماره ۲۱۹ (کانال متوسط قلب) ۷۸
- شکل ۵۱: تغییرات دمای سیال در خروجی کانال شماره ۲۲۰ (کانال متوسط قلب) ۷۸
- شکل ۵۲: تغییرات دمای سیال در خروجی انشعاب شماره ۲۲۱ (بخش بالای قلب راکتور) ۷۸
- شکل ۵۳: تغییرات دمای سیال در خروجی لوله شماره ۲۲۲ (پایه گرم خروجی از راکتور) ۷۹
- شکل ۵۴: تغییرات دمای سیال در خروجی لوله شماره ۲۲۴ (پایه گرم ورودی به مولد بخار) ۷۹
- شکل ۵۵: تغییرات دمای سیال در خروجی بخش اولیه مولد بخار شماره ۲۳۰ ۷۹
- شکل ۵۶: تغییرات دمای مرکز سوخت در مرکز کانال‌های قلب راکتور (حجم محوری شماره ۵) ۸۰
- شکل ۵۷: تغییرات دمای سطح غلاف سوخت در مرکز کانال‌های قلب راکتور (حجم محوری شماره ۵) ۸۰
- شکل ۵۸: تغییرات سرعت سیال در خروجی پمپ شماره ۲۰۷ ۸۱
- شکل ۵۹: تغییرات سرعت سیال در خروجی لوله شماره ۲۱۴ (پایین ریز ورودی به بخش پایینی راکتور) ۸۱
- شکل ۶۰: تغییرات سرعت سیال در خروجی کانال شماره ۲۱۶ (کانال کنارگذر قلب راکتور) ۸۱
- شکل ۶۱: تغییرات سرعت سیال در خروجی کانال شماره ۲۱۸ (کانال داغ قلب راکتور) ۸۲

- شکل ۶۲: تغییرات سرعت سیال در خروجی کانال شماره ۲۱۹ (کانال متوسط قلب راکتور)..... ۸۲
- شکل ۶۳: تغییرات سرعت سیال در خروجی کانال شماره ۲۲۰ (کانال سرد قلب راکتور)..... ۸۲
- شکل ۶۴: تغییرات سرعت سیال در خروجی انشعاب شماره ۲۲۱ (خروجی محفظه راکتور)..... ۸۳
- شکل ۶۵: تغییرات سرعت سیال در خروجی لوله شماره ۲۲۴ (ورودی مولد بخار)..... ۸۳
- شکل ۶۶: تغییرات سرعت سیال در خروجی مولد بخار شماره ۲۳۰..... ۸۳
- شکل ۶۷: تغییرات هد پمپ شماره ۲۰۷..... ۸۴
- شکل ۶۸: تغییرات فشار سیال در ورودی محفظه راکتور (ورودی لوله شماره ۲۱۴)..... ۸۴
- شکل ۶۹: تغییرات فشار سیال در خروجی محفظه راکتور (خروجی انشعاب شماره ۲۲۱)..... ۸۴
- شکل ۷۰: تغییرات فشار در ورودی مولد بخار شماره ۲۳۰..... ۸۵
- شکل ۷۱: تغییرات فشار در خروجی مولد بخار شماره ۲۳۰..... ۸۵
- شکل ۷۲: تغییرات دبی سیال محاسبه شده پس از خاموشی پمپ..... ۸۶
- شکل ۷۳: تغییرات دبی سیال عبوری از کانال کنارگذر قلب راکتور در حالت خاموشی یک پمپ..... ۸۶
- شکل ۷۴: تغییرات دبی سیال عبوری از کانال داغ قلب راکتور در حالت خاموشی یک پمپ..... ۸۷
- شکل ۷۵: تغییرات دبی سیال عبوری از کانال متوسط قلب راکتور در حالت خاموشی یک پمپ..... ۸۷
- شکل ۷۶: تغییرات دبی سیال عبوری از کانال سرد قلب راکتور در حالت خاموشی یک پمپ..... ۸۸
- شکل ۷۷: تغییرات دمای سیال خروجی از قلب راکتور در حالت خاموشی یک پمپ..... ۸۸
- شکل ۷۸: تغییرات دبی سیال در ورودی قلب راکتور در حالت خاموشی دو پمپ..... ۸۹
- شکل ۷۹: تغییرات دبی سیال عبوری از کانال کنارگذر قلب راکتور در حالت خاموشی دو پمپ..... ۸۹
- شکل ۸۰: تغییرات دبی سیال عبوری از کانال داغ قلب راکتور در حالت خاموشی دو پمپ..... ۹۰
- شکل ۸۱: تغییرات دبی سیال عبوری از کانال متوسط قلب راکتور در حالت خاموشی دو پمپ..... ۹۰
- شکل ۸۲: تغییرات دبی سیال عبوری از کانال سرد قلب راکتور در حالت خاموشی دو پمپ..... ۹۱
- شکل ۸۳: تغییرات دمای خروجی قلب راکتور در حالت خاموشی دو پمپ..... ۹۱
- شکل ۸۴: تغییرات کسر حجمی بخار خروجی از کانال داغ قلب راکتور در حالت خاموشی دو پمپ..... ۹۲
- شکل ۸۵: تغییرات کسر حجمی بخار خروجی از کانال متوسط قلب راکتور در حالت خاموشی دو پمپ..... ۹۲

لیست جدول‌ها

- جدول شماره ۱: ضریب افت فشار برای برخی شیرها و اتصالات زاویه‌دار ۲۸
- جدول شماره ۲: نمونه ضریب افت فشار در مقطع انقباض جریان ملایم ۳۱
- جدول شماره ۳: تعریف پارامترهای منحنی‌های متشابه پمپ ۳۷
- جدول شماره ۴: ضرایب مورد نیاز برای محاسبه ضریب جابجایی حرارتی جریان تکفاز در بخش ثانویه مولد بخار [۷] ۵۱
- جدول شماره ۵: مشخصات کانال‌های قلب راکتور ۵۹
- جدول شماره ۶: انشعاب‌های پایین و بالای قلب راکتور ۶۱
- جدول شماره ۷: مشخصات کانال استوانه‌ای و میله سوخت راکتور نیروگاه بوشهر ۶۲
- جدول شماره ۸: ضرایب توزیع محوری توان در میله‌های سوخت ۶۳
- جدول شماره ۹: تغییرات ضریب رسانش حرارتی سوخت، گپ و غلاف میله سوخت بوشهر بصورت تابعی از دما ۶۳
- جدول شماره ۱۰: تغییرات ظرفیت گرمایی ویژه حجمی سوخت، گپ و غلاف میله سوخت بوشهر بصورت تابعی از دما ۶۴
- جدول شماره ۱۱: مشخصات خطوط لوله سرد و گرم ۶۵
- جدول شماره ۱۲: مشخصات پمپ‌های مدار اولیه نیروگاه بوشهر ۶۷
- جدول شماره ۱۳: داده‌های منحنی‌های مشخصه متشابه هد پمپ نیروگاه بوشهر ۶۷
- جدول شماره ۱۴: داده‌های منحنی‌های مشخصه متشابه گشتاور پمپ نیروگاه بوشهر ۶۸
- جدول شماره ۱۵: مشخصات مولد بخار نیروگاه بوشهر ۶۹
- جدول شماره ۱۶: تغییرات دما و فشار ورودی با زمان ۷۰
- جدول شماره ۱۷: تغییرات دبی ورودی در هر مدار با زمان ۷۰
- جدول شماره ۱۸: تغییرات توان تولیدی در کانال‌های قلب راکتور با زمان ۷۱

۱- چکیده

کد LOOP2.0 نسخه دوم کد تحلیل ترموهیدرولیکی در مدارهای نیروگاه‌های هسته‌ای است که در آن قابلیت مدل‌سازی شرایط گذرا افزوده شده است. کد LOOP-I به منظور مدل‌سازی شرایط ترموهیدرولیکی در مدار اولیه نیروگاه‌های هسته‌ای و راکتورهای تحقیقاتی آب سبک در حالت پایا تحت عنوان بسته نوزدهم مرکز محاسبات پیشرفته هسته‌ای ارائه گردید. کد LOOP2.0 شامل اجزای کانال استوانه‌ای و مستطیلی (با سازه‌های حرارتی میله و تیغه با مدل‌های جریان دوفاز همگن و شار رانشی)، انشعاب، اتصال، تک‌حجم، پمپ و مولد بخار است که برای حالت‌های گذرای توان، دبی، دما و فشار ارائه شده است. به طور مختصر، تغییرات انجام شده که منجر به کد LOOP2.0 شد، شامل تغییر ساختار برنامه کامپیوتری مدار به ساختار جدید گذرا، ارائه مدل‌های گذرای اتصال، تک‌حجم، انشعاب، پمپ و مولد بخار است. حالت‌های گذرای در نظر گرفته شده در این کد شامل حالت‌های گذرای توان در کانال‌های حاوی سازه حرارتی و حالت‌های گذرای دبی، دما، فشار و کیفیت سیال می‌باشد. به منظور اعتبارسنجی نتایج به دست آمده از اجرای برنامه برای مسائل نمونه، از کد RELAP5 استفاده شده است. با مقایسه نتایج حاصل، همخوانی مناسبی بین مقادیر محاسبه شده توسط کد LOOP2.0 و کد RELAP5 بدست آمده است.

لازم به ذکر است قابلیت‌های کد LOOP-I در کد LOOP2.0 نیز 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 فاصله گازی 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 گذرا 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.

۲- کلیدواژه

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

۳- اختصارات

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

۴- مقدمه

در این کد 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 حالت‌های گذرای توان، دبی، دما و فشار محاسبه می‌شوند. اجزای مدار توسط مدل‌های تک‌حجم، کانال، انشعاب، پمپ، اتصالات و مولد بخار مدل‌سازی شده و مشخصات ترموهیدرولیکی 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 نیمه‌تجربی 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 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 گذرا حل می‌شود. تعیین شرایط مرزی بین سیال و سازه حرارتی با استفاده از روابط ضریب جابجایی حرارتی و شار حرارتی بحرانی انجام می‌شود.

الگوریتم حالت گذرا، بصورت جزء به جزء، اجزای مدار را از لحظه شروع تا لحظه پایان حالت گذرا حل می‌کند. در این روش برای هر جزء از مدار از ابتدا تا انتهای بازه زمانی حالت گذرا، محاسبات انجام می‌شود و نتایج خروجی آن جزء بصورت تابعی از زمان، بعنوان پارامترهای ورودی به جزء بعدی منتقل می‌شود. آنگاه مجدداً حل حالت گذرا با توجه به پارامترهای حاصل از جزء پیشین برای این جزء انجام می‌گیرد. این روند تا پایان یافتن تمامی اجزای مدار که توسط کاربر تعریف شده‌اند ادامه می‌یابد. به عبارت دیگر در این حالت کلیه زیربرنامه‌های مربوط به مدل‌سازی اجزای مختلف مدار بصورت جداگانه گذرا می‌شوند و هر کدام یک حلقه زمانی مجزا دارند.

این روش بر اساس بررسی‌های انجام شده و با توجه به مزایای موجود و همچنین بر اساس الزامات موجود در بخش بهینه‌سازی و واسط کاربری در نظر گرفته شده است. از جمله مزایای این روش می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- در کدهای تجاری موجود ابتدا کل فایل متن ورودی از ابتدا تا انتها خوانده می‌شود و پس از بررسی صحت ورودی و برقراری ارتباط بین اجزا کل فایل ورودی در حافظه ذخیره شده و حل مسئله شروع می‌شود، که البته این روند درستی است. اما با توجه به استفاده از واسط گرافیکی کاربری در کدهای این مرکز، کاربر ملزم به وارد کردن اطلاعات بصورت صحیح می‌باشد. به عبارت دیگر واسط

گرافیکی کاربری وظیفه پردازش اطلاعات ورودی را از طریق اعمال قیدهای لازم انجام می‌دهد و نیازی به پردازش ورودی توسط کد نمی‌باشد. بنابراین در این روش نیازی به خواندن کل اطلاعات ورودی و سپس شروع حل نمی‌باشد و با خواندن پارامترهای هر جزء می‌توان زیربرنامه حل گذرای آن را فراخواند.

- در صورتیکه کاربر تغییری در مشخصات هندسی یا شرایط مسأله در فایل ورودی انجام دهد کدهای تجاری این تغییر را بعنوان یک مسأله جدید در نظر می‌گیرند و این مسأله باید از ابتدا حل شود. اما در روش انتخابی کافی است حل جدید تنها برای اجزای مدار که پس از محل تغییر قرار دارند، انجام شود.
- مزیت دیگر این روش راحتی توسعه پذیری آن است. در این روش در صورتیکه جزئی به مدار افزوده شود، کافی است زیربرنامه حل کننده آن به همراه تغییر جزئی در برنامه اصلی افزوده شود و نیازی به تغییر ساختار کلی برنامه نمی‌باشد.

۵- دامنه گزارش

دامنه گزارش ارائه شده شامل ارائه کد محاسبات ترموهیدرولیکی مدار جهت تحلیل چندین مدار شامل انشعاب، اتصالات، تک‌حجم، مولد بخار و کانال‌های استوانه‌ای و مستطیلی با سازه حرارتی میله سوخت یا تیغه سوخت، با جریان دوفاز مدل‌های همگن و شار رانشی، در حالت‌های گذرای توان، دبی، دما، فشار و کیفیت می‌باشد.

۶- حل حالت گذرا

در روش گذرای انتخابی که هر جزء از اجزای مدار بصورت وابسته به زمان حل می‌شود، زیربرنامه‌های گذرای اجزای مختلف مدار، در فایل اصلی برنامه قرار دارند. روندنمای حل کلی برنامه به این روش در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به این روندنما، ابتدا پارامترهای مربوط به شرایط مرزی مسأله بصورت وابسته به زمان تحت عنوان جزء آغازین^۱ خوانده می‌شود. این پارامترها شامل دما، فشار، کیفیت و دبی ورودی است که بصورت جدول تغییرات زمانی باید وارد شوند. سپس مقدار پارامترهای وابسته به زمان ورودی خوانده شده، در هر گام زمانی داده شده توسط کاربر، با میانبایی خطی بر اساس زمان تعیین می‌گردد. پس از آن پارامترهای حاصل بعنوان پارامترهای خروجی جزء آغازین در حافظه ذخیره می‌گردد.

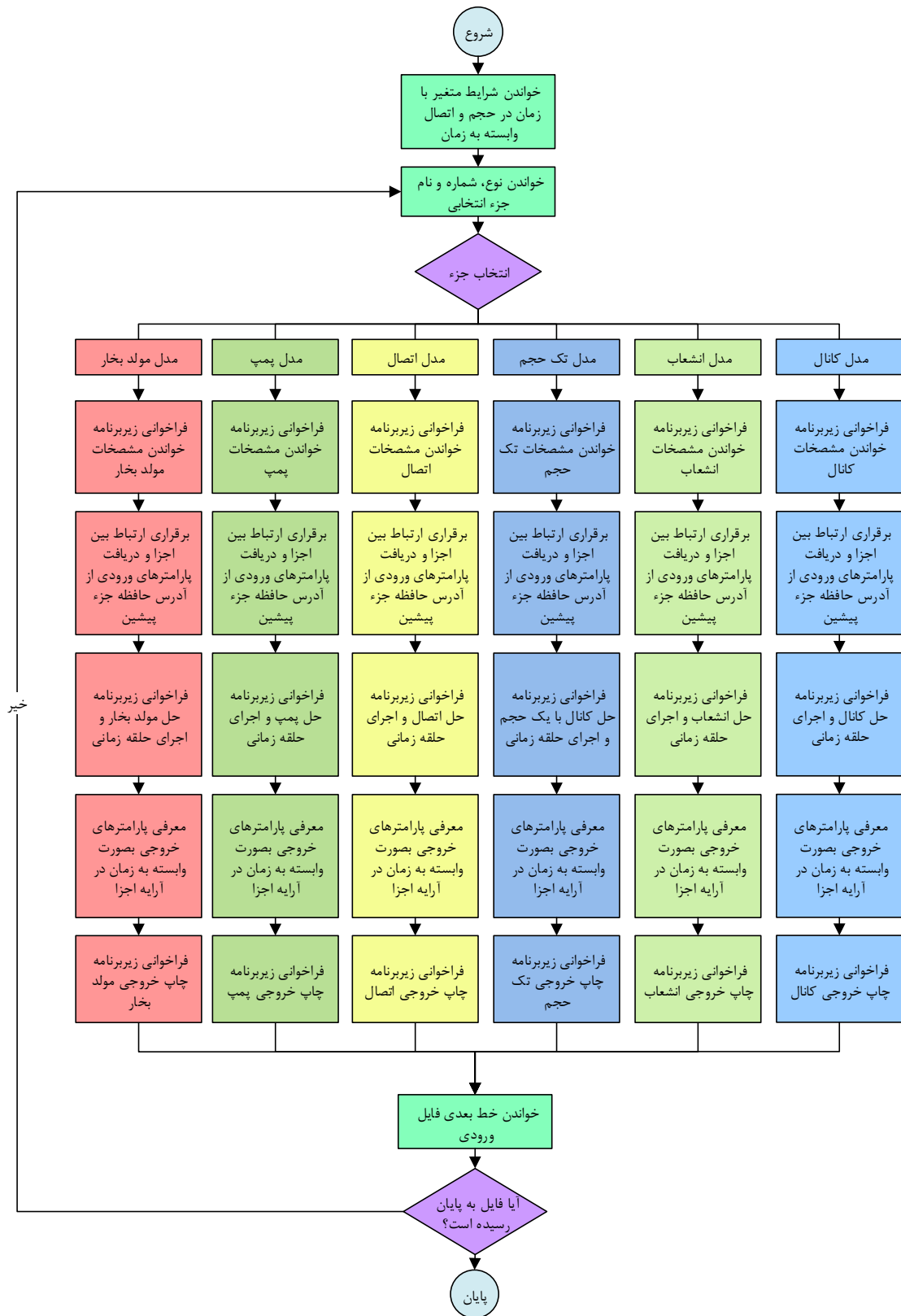
در ساختار جدید برنامه هر جزء شامل سه شماره جزء کنونی، جزء پیشین و جزء پسین است. پس از خواندن مشخصات هر جزء در زیربرنامه مربوط به خواندن ورودی، زیربرنامه حل حالت گذرای مربوط به آن جزء فراخوانده می‌شود. در این زیربرنامه ابتدا پارامترهای خروجی جزء پیشین بعنوان پارامترهای ورودی جزء کنونی تعیین می‌شود و پس از اجرای حل در این زیربرنامه، پارامترهای خروجی این جزء در آرایه اجزای مدار در حافظه قرار می‌گیرد. سپس در زیربرنامه چاپگر، پارامترهای خروجی بصورت تابعی از زمان چاپ می‌شود. در ادامه روند اجرای برنامه به برنامه اصلی بازگشته و مشخصات جزء بعدی خوانده می‌شود. این روند برای کلیه اجزا تا انتهای مسأله تعریف شده ادامه می‌یابد.

اجزای بکار رفته در این کد شامل جزء آغازین، کانال، تک‌حجم، اتصالات، انشعاب، پمپ و مولد بخار است. در ادامه توضیحاتی درباره این اجزا ارائه می‌گردد.

۷- مدل کانال

اساسی‌ترین 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 راکتورهای غربی و همچنین کانال مستطیلی برای مدل‌سازی کانال‌های تولید توان در راکتورهایی مانند راکتور تحقیقاتی تهران است.

در مدل محاسباتی سیال از روش اختلاف محدود به روش ضمنی استفاده شده است. 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. گذره‌های ممکن در کانال شامل تغییرات توان تولیدی و تغییرات دبی، فشار، دما و کیفیت در زمان می‌باشد. در ادامه به معادلات بکار رفته در مدل کانال اشاره می‌شود.



شکل ۱: روندنمای کلی برنامه مدار در حالت گذرا

۱-۷- معادلات بقای جرم، انرژی و مومنتم وابسته به زمان

معادلات بقای مورد نیاز در مرجع [۸] تشریح شده‌اند. 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.

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial G_m}{\partial z} = 0 \quad (1-7)$$

که در آن چگالی مخلوط مایع و بخار و G_m سرعت جرمی سیال مخلوط مایع و بخار است. معادله‌ی بقای مومنتم استفاده شده در مدل همگن بصورت زیر است.

$$\frac{\partial G_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{G_m^2}{\rho_m} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{f_{TP} G_m^2}{2D_e \rho_m} - \rho_m g \quad (2-7)$$

در معادله‌ی فوق، g شتاب جاذبه، ضریب اصطکاک دوفاز، D_e قطر هیدرولیکی کانال و P فشار سیال است. معادله‌ی بقای انرژی در مدل همگن بصورت زیر است.

$$\frac{\partial (\rho_m h_m)}{\partial t} + \frac{\partial (G_m h_m)}{\partial z} = \frac{q'' P_h}{A_z} + \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{G_m}{\rho_m} \left[\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{f_{TP} G_m^2}{2D_e \rho_m} \right] \quad (3-7)$$

در معادله فوق 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، مومنتم و انرژی مخلوط دوفاز و یک معادله مربوط به بقای جرم بخار می‌باشد. معادله بقای جرم مخلوط مشابه رابطه (۱-۷) است. معادله بقای مومنتم مخلوط در مدل شار رانشی بصورت زیر است.

$$\frac{\partial G_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{G_m^2}{\rho_m} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} - \frac{f_{TP} G_m^2}{2D_e \rho_m} - \rho_m g - \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\alpha \rho_g \rho_l \bar{V}_{gj}^{-2}}{(1-\alpha) \rho_m} \right] \quad (4-7)$$

\bar{V}_{gj} سرعت رانش^۱ متوسط فاز گاز است که از رابطه (۵-۷) بدست می‌آید. با مقایسه رابطه (۴-۷) با (۲-۷) مشاهده می‌شود که تنها تفاوت موجود بین دو روش دوفاز در این معادله، مربوط به ترم افت مومنتم حاصل از اختلاف سرعت بین دوفاز است.

$$\bar{V}_{gj} = \frac{\rho_m (V_{gj} + (C_0 - 1)v_m)}{\rho_m - (C_0 - 1)\alpha(\rho_l - \rho_g)} \quad (5-7)$$

$$v_g = v_m + \frac{\rho_l}{\rho_m} \bar{V}_{gj} \quad (6-7)$$

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

در روابط فوق v_g ، v_l و v_m به ترتیب سرعت بخار، سرعت مایع و سرعت متوسط مخلوط هستند. V_{gj} از رابطه زیر برای جریان حبابی محاسبه می‌شود. این رابطه در مرجع [۴] ارائه شده است.

$$V_{gj} = \sqrt{2} \left(\frac{\Delta \rho g \sigma}{\rho_f^2} \right)^{1/4} (1-\alpha_g)^{1.75} \quad (8-7)$$

$\Delta \rho$ اختلاف چگالی مایع و بخار اشباع، ρ_f چگالی مایع اشباع، σ ضریب کشش سطحی، g شتاب جاذبه و α_g کسر حجمی بخار می‌باشد. معادله بقای انرژی در مدل شار رانشی بصورت زیر است:

$$\frac{\partial(\rho_m h_m)}{\partial t} + \frac{\partial(G_m h_m)}{\partial z} = \frac{q P_h}{A_z} + \frac{\partial p}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\alpha \rho_g \rho_l}{\rho_m} (h_g - h_l) \bar{V}_{gj} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\alpha \rho_g \rho_l}{\rho_m} (h_g - h_l) \bar{V}_{gj} \right] + \left[v_m + \frac{\alpha(\rho_l - \rho_g)}{\rho_m} \bar{V}_{gj} \right] \frac{\partial p}{\partial z} \quad (9-7)$$

معادله بقای جرم فاز گاز نیز بصورت زیر است:

$$\frac{\partial(\rho_g \alpha)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_g \alpha v_m)}{\partial z} = \Gamma - \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\alpha \rho_g \rho_l \bar{V}_{gj}}{\rho_m} \right] \quad (10-7)$$

ρ_g چگالی گاز و Γ پارامتر مربوط به میزان تولید بخار است که از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۰].

$$\Gamma = \chi \left(\frac{q}{h_{fg}} \right) \quad (11-7)$$

در این رابطه، q توان حرارتی تولیدی بر واحد حجم، h_{fg} آنتالپی اشباع و χ کسر تبخیر است که از رابطه (۷-۱۲) بدست می‌آید.

$$\chi = \frac{\min(h_{av}, h_f) - h_{cr}}{(1+\varepsilon)(h_f - h_{cr})} \quad (12-7)$$

در این رابطه، h_{av} آنتالپی سیال، h_f آنتالپی مایع اشباع، h_{cr} آنتالپی بحرانی و ε ضریب تلاطم است که از رابطه (۷-۱۶) قابل محاسبه می‌باشد. آنتالپی بحرانی معیاری برای تولید بخار و یا بعبارت دیگر معیاری برای جدایش حباب در نظر گرفته می‌شود. در صورتیکه آنتالپی

سیال از آنتالپی بحرانی بیشتر باشد، کسر حجمی بخار مثبت خواهد بود. این اتفاق می‌تواند در حالت مادون اشباع رخ دهد. این پارامتر از رابطه Saha-Zuber بهبود یافته، بصورت زیر معرفی شده است [۱۱].

$$h_{CR} = \begin{cases} h_f - \frac{St \times Pe^{0.124} \times C_{pf}}{0.0287}, & Pe \geq 52000 \\ h_f - \frac{St \times Pe^{0.08} \times C_{pf}}{918.525}, & Pe < 52000 \end{cases} \quad (13-7)$$

در این رابطه، Pe عدد بی‌بعد پکلت (۷-۱۴)، C_{pf} ظرفیت گرمایی ویژه مایع اشباع، h_f آنتالپی مایع اشباع و St عدد بی‌بعد استنتن (۷-۷) است. لازم به ذکر است رابطه قدیمی‌تر Saha-Zuber برای محاسبه آنتالپی بحرانی نیز در کد استفاده شده است. این رابطه در مرجع [۱۰] ارائه شده است.

$$Pe = Re \times Pr \quad (14-7)$$

$$St = \frac{Nu}{Re \times Pr} \quad (15-7)$$

ضریب تلاطم از رابطه (۷-۱۶) بدست می‌آید.

$$\varepsilon = \frac{\rho_f (h_f - \min(h_f, h_{av})) - h_{cr}}{\rho_g h_{fg}} \quad (16-7)$$

این پارامتر بصورت نسبت بخشی از گرمای تولیدی که صرف افزایش آشفستگی سیال در حالت دوفاز می‌شود به بخشی از گرمای تولیدی که صرف تبخیر می‌شود، تعریف می‌گردد.

۷-۲- روابط کمکی بخش هیدرودینامیکی

۷-۲-۱- 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^۱ ضریب اصطکاک قابل دستیابی است. برای محاسبه‌ی ضریب اصطکاک جریان دوفاز از رابطه مارتینلی استفاده شده است.

$$f_{TP} = f_0 \times \left[1 + x \frac{v_{fg}}{v_f} \right] \times \left[1 + x \left(\frac{\mu_{fg}}{\mu_g} \right) \right]^{-1/4} \quad (17-7)$$

در روابط فوق، x کیفیت، μ_f لزجت مایع اشباع، μ_{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.

۷-۲-۲- روابط کیفیت و کسر حجمی بخار در مدل جریان دوفاز همگن

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 پیش‌بینی کسر حجمی بخار استفاده کرد. در برنامه ارائه شده از رابطه Levy برای پیش‌بینی کیفیت در جریان مادون سرد و همچنین جریان اشباع استفاده شده است. این روابط در ادامه ارائه شده است [۱].

$$\begin{cases} x = x_e - x_d \exp\left(\frac{x_e}{x_d} - 1\right), & x_e \geq x_d \\ x = 0, & x_e < x_d \end{cases} \quad (18-7)$$

$$x_d = -\frac{C_{pf} \Delta T_d}{h_{fg}} \quad (19-7)$$

$$Y_B^+ = \frac{0.015 \left[\frac{\sigma D_h}{v_f} \right]^{1/2}}{\mu_f} \quad (20-7)$$

$$\begin{cases} \Delta T_d = \frac{q'}{P_h H_f} - Q \Pr Y_B^+, & 0 \leq Y_B^+ \leq 5 \\ \Delta T_d = \frac{q'}{P_h H_f} - 5Q \left[\Pr + \ln \left[1 + \Pr \left(\frac{Y_B^+}{5} - 1 \right) \right] \right], & 5 < Y_B^+ < 30 \\ \Delta T_d = \frac{q'}{P_h H_f} - 5Q \left[\Pr + \ln(1 + \Pr) + 0.5 \ln \left(\frac{Y_B^+}{30} \right) \right], & 30 \leq Y_B^+ \end{cases} \quad (21-7)$$

$$Q = \frac{q'}{P_h C_{pf} (\rho_f \tau_w)^{1/2}} \quad (22-7)$$

$$\tau_w = 0.125 f v_f G^2 \quad (23-7)$$

$$H_f = 0.023 \text{Re}_f^{0.8} \Pr_f^{0.4} \frac{k_f}{D_h} \quad (24-7)$$

$$\alpha = \frac{x v_g}{(1-x)v_f S + x v_g} \quad (25-7)$$

در روابط فوق، α ، کیفیت غیر تعادلی، x_e ، کیفیت تعادلی، C_{pf} ، ظرفیت گرمایی مایع اشباع، h_{fg} ، آنتالپی اشباع، D_h ، قطر هیدرولیکی، σ ، کشش سطحی سیال، μ_f ، لزجت مایع اشباع، ν ، حجم مخصوص، q' ، توان خطی (وات بر متر)، H_f ، ضریب جابجایی حرارتی سیال در مجاورت دیواره، P_h ، محیط گرم شده، Pr ، عدد پرانتل، τ_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 (۷-۲۵) استفاده شده است. در جریان همگن مقدار پارامتر S برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود.

هر دو حالت مدل جریان همگن ($S=1$) و رابطه (۷-۲۶) در برنامه قابل لحاظ است. رژیم جریان توسط مقادیر کسر حجمی بخار مرزی بین رژیم‌های مختلف تعیین می‌شود. این مقادیر مرزی عبارتند از:

- α_{BS} : کسر حجمی بخار مرزی بین رژیم جریان حبابی^۱ و اسلاگ^۲
- α_{SA} : کسر حجمی بخار مرزی بین رژیم جریان اسلاگ و حلقوی^۳
- α_{AM} : کسر حجمی بخار مرزی بین رژیم جریان حلقوی و قطرات آب معلق^۴ (پیش از شار حرارتی بحرانی)

روابط ارائه شده برای مقادیر فوق در مرجع [۲] آمده است.

۷-۳- حل معادله انتقال حرارت به روش اختلاف محدود

در روش 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:

$$\iiint_V \rho(T, x) \frac{\partial T}{\partial t}(x, t) dV = \iint_S k(T, x) \nabla T(x, t) \cdot ds + \iiint_V S(x, t) dV \quad (۷-۲۷)$$

پارامترهای رابطه (۷-۲۷) عبارتند از:

- k : ضریب رسانش حرارتی
- S : سطح
- S : چشمه حرارتی داخلی
- t : زمان
- T : دما

۱ - Bubbly

۲ - Slug

۳ - Annular

۴ - Mist-Annular

- V : حجم
- x : بعد مکان
- ρ : ظرفیت گرمایی حجمی

با انتگرال‌گیری از معادله (۷-۲۷) رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$\frac{(T_m^{n+1} - T_m^n)G_m}{\Delta t} = -(T_m - T_{m-1})k_{lm}\delta_{lm}^s + (T_{m+1} - T_m)k_{rm}\delta_{rm}^s + P_f P(t)(Q_{lm}\delta_{lm}^v + Q_{rm}\delta_{rm}^v) \quad (۷-۲۸)$$

با استفاده از عبارت ζ_m به جای ترم سمت راست داریم:

$$\frac{(T_m^{n+1} - T_m^n)G_m}{\Delta t} = \zeta_m \quad (۷-۲۹)$$

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

$$\frac{(T_m^{n+1} - T_m^n)G_m}{\Delta t} = w\zeta_m^{n+1} + (1-w)\zeta_m^n \quad (۷-۳۰)$$

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. در کد RELAP5 از فرمول ضمنی، $w=1/2$ ، روش Crank-Nickelson استفاده می‌شود. پس از مرتب کردن رابطه بر اساس دما در گره‌ها رابطه (۷-۳۰) بصورت رابطه (۷-۳۱) نوشته می‌شود.

$$a_m^n T_{m-1}^{n+1} + b_m^n T_m^{n+1} + c_m^n T_{m+1}^{n+1} = d_m \quad (۷-۳۱)$$

$$a_m^n = -\frac{k_{lm}^n \delta_{lm}^s \Delta t}{\sigma + 1} \quad (۷-۳۲)$$

$$b_m^n = \sigma G_m^n - a_m^n - c_m^n \quad (۷-۳۳)$$

$$c_m^n = -\frac{k_{rm}^n \delta_{rm}^s \Delta t}{\sigma + 1} \quad (۷-۳۴)$$

$$d_m = -\sigma a_m^n T_{m-1}^n + \sigma(G_m^n + a_m^n + c_m^n)T_m^n - \sigma c_m^n T_{m+1}^n + \Delta t P_f \left(\frac{P^{n+1} + \sigma P^n}{\sigma + 1} \right) (Q_{lm}\delta_{lm}^v + Q_{rm}\delta_{rm}^v) \quad (۷-۳۵)$$

در حالت گذرا مقدار σ برابر ۱ و Δt گام زمانی است و در حالت پایا مقدار σ برابر صفر و Δt 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 طبق مرجع [۲] در نظر گرفته می‌شود.

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

$$\delta_{lm}^v = \frac{\delta_{lm}}{2}, \delta_{rm}^v = \frac{\delta_{rm}}{2}, \delta_{lm}^s = \frac{1}{\delta_{lm}}, \delta_{rm}^s = \frac{1}{\delta_{rm}}, \delta_m^b = 1 \quad (۷-۳۶)$$

برای هندسه استوانه‌ای پارامترهای هندسی عبارتند از:

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

$$\delta_{lm}^s = \frac{2\pi}{\delta_{lm}} \left(x_m - \frac{\delta_{lm}}{2} \right), \delta_{rm}^s = \frac{2\pi}{\delta_{rm}} \left(x_m + \frac{\delta_{rm}}{2} \right), \quad (37-7)$$

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

برای هندسه کروی پارامترهای هندسی عبارتند از:

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

$$\delta_{lm}^s = \frac{4\pi}{\delta_{lm}} \left(x_m - \frac{\delta_{lm}}{2} \right)^2, \delta_{rm}^s = \frac{4\pi}{\delta_{rm}} \left(x_m + \frac{\delta_{rm}}{2} \right)^2, \quad (38-7)$$

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

و برای همه هندسه‌ها داریم:

$$G_m = \rho_{lm} \delta_{lm}^v + \rho_{rm} \delta_{rm}^v \quad (39-7)$$

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

در برنامه، دو حالت برای تعیین ضریب رسانش حرارتی مواد وجود دارد. حالت اول که حالت پیش فرض است ضریب رسانش سوخت (اکسید اورانیوم و سوخت مخلوط اورانیوم و آلومینیوم همانند سوخت راکتور تهران)، 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 [۱].

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

$$w = A + 1.216 \times 10^{-4} \times e^{(1.867 \times 10^{-3} \times T)} \quad (40-7)$$

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

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

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

$$K = 2.639 \times 10^{-3} \times T^{0.7085} \quad (41-7)$$

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 زیرکونیومی بصورت زیر است.

$$w = \left[(7.67 \times 10^{-9} \times T - 1.45 \times 10^{-5}) \times T + 0.0209 \right] \times T + 7.51 \quad (42-7)$$

$$K = \frac{1.6056 \times 10^{-4} \times w}{1.604972 \times 10^{-4}}$$

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 بین‌المللی انرژی اتمی استفاده شده است [۳].

$$K = 180.26 - 2.29 \times 10^{-2} \times T \quad (43-7)$$

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.

$$K = 130 \times e^{-\left(\frac{T-196.3}{343}\right)^2} + 213.1 \times e^{-\left(\frac{T-759.9}{599.7}\right)^2} \quad (44-7)$$

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

۷-۴- معادلات مرز مشترک سیال و سازه حرارتی

شرط مرز مشترک بخش هیدرودینامیکی و حرارتی توسط ضریب جابجایی حرارتی سیال در کنار دیواره و دمای توده 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.

۷-۴-۱- ضریب جابجایی حرارتی

برای محاسبه ضریب جابجایی حرارتی سیال آشفته‌ی تک‌فاز از معادله Dittus-Boelter (۷-۴۵) استفاده می‌شود. این معادله شامل دو ضریب است. یکی از دو ضریب مشابه عدد رینولدز است و بیانگر نسبت انتقال مومنتم به نیروی لزجت است و ضریب دوم مشابه عدد پراتل است که بیانگر نسبت پخش مومنتم به پخش حرارتی است.

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

$$b = \left[\frac{C_p \mu}{k} \right]^{1/3} \quad (45-7)$$

$$h_{conv_{sub}} = \frac{0.023K}{D} \times a \times b$$

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 [۵]:

$$h_{conv_{TP}} = h_c + h_{NcB}$$

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

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

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

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

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

(۴۶-۷)

پارامتر ΔT_{sat} ، اختلاف دمای دیواره و دمای اشباع سیال و ΔP_{sat} ، اختلاف فشار اشباع در دمای دیواره و فشار سیال است. سایر پارامترهای روابط فوق مشابه روابط قبل است و نیازی به تعریف مجدد آنها نمی‌باشد. رابطه Chen برای جریان دوفاز با جوشش هسته‌ای مادون سرد و اشباع استفاده می‌شود. این رابطه را بصورت دیگر نیز می‌توان نوشت. در این رابطه ضریب جابجایی حرارتی جوشش هسته‌ای اشباع و مادون سرد بصورت حاصل جمع دو بخش جابجایی حرارتی ماکروسکوپی و میکروسکوپی نوشته می‌شود.

$$h_{conv_{TP}} = h_{mac} \times F + h_{mic} \times S$$

(۴۷-۷)

در این رابطه h_{mic} همان رابطه Dittus-Boelter برای خواص سیال در حالت مایع و h_{mac} همان پارامتر h_{NcB} بدون ضریب S است. پارامتر S ضریب تصحیح است که از نمودار ذکر شده در مرجع [۵] و یا رابطه (۴۸-۷) بدست می‌آید. همچنین ضریب F در رابطه (۴۷-۷) از رابطه (۴۸-۷) بدست می‌آید.

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

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

(۴۸-۷)

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

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

پارامتر F در رابطه (۴۸-۷) برای جریان جوشش هسته‌ای اشباع بکار می‌رود. برای جوشش مادون سرد این ضریب بصورت زیر اصلاح می‌شود.

$$\begin{cases} F' = F - 0.2(T_{sat} - T_f) \times (F - 1), & 0 < T_{sat} - T_f \leq 5 \\ F' = 1, & 5 < T_{sat} - T_f \end{cases} \quad (49-7)$$

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

۷-۴-۲- همبسته‌سازی معادلات سیال و انتقال حرارت

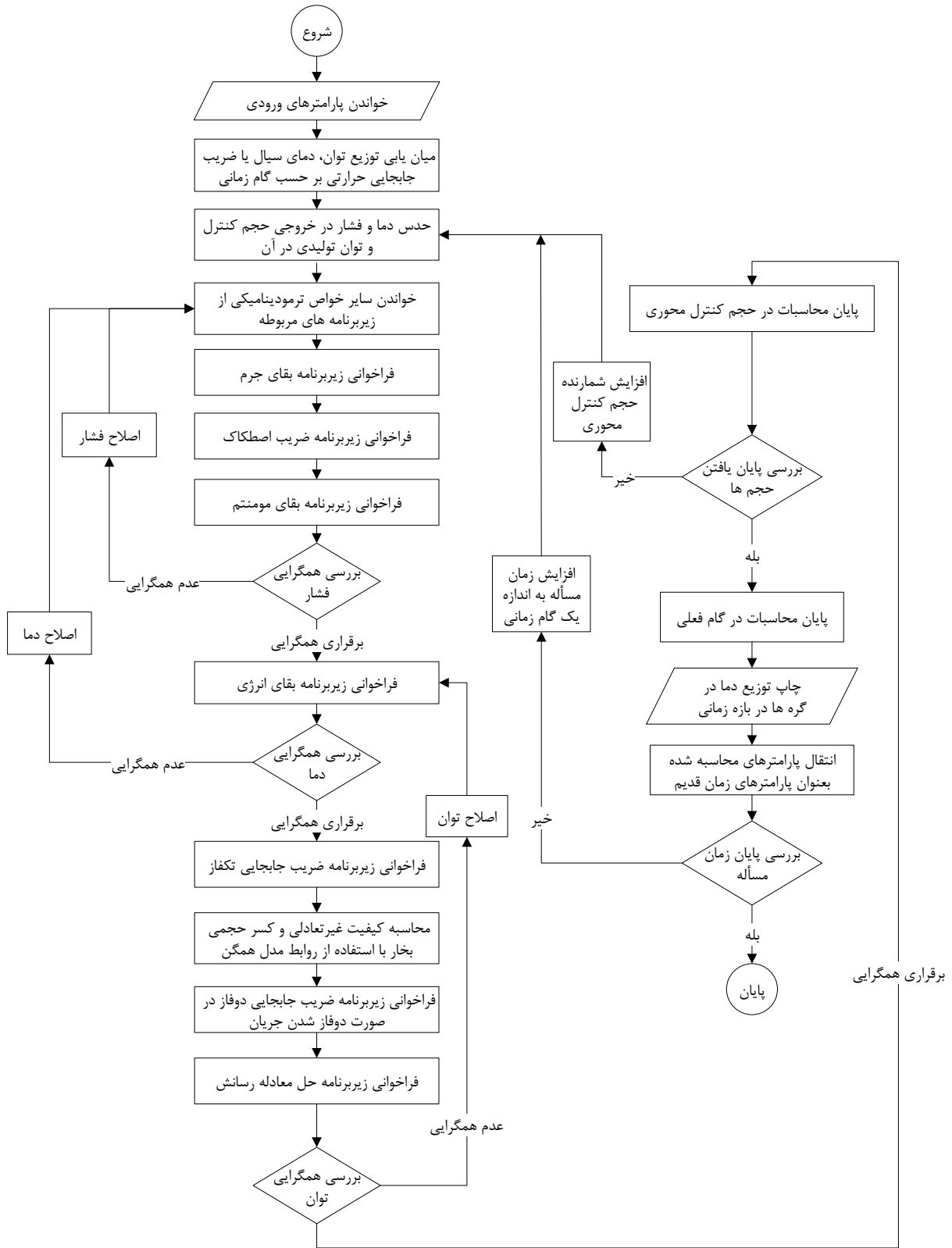
یکی از نکات تمایز حل حالت گذرا با حل حالت پایا، نحوه همبسته کردن محاسبات سیال و معادله انتقال حرارت سوخت است. این همبستگی بدین صورت لحاظ شده است که ابتدا معادله جرم و مومنتم حل شده و با حدس اولیه مقدار توان تولیدی در کانال، آنتالپی و دمای سیال محاسبه می‌شوند. نحوه ارتباط معادلات سوخت و سیال بدین ترتیب است که در هر بازه زمانی پس از حدس مقدار دمای سیال با استفاده از مقادیر بدست آمده در زمان قبل برای پارامترهای ضریب انتقال حرارت و دمای دیواره میزان توان منتقل شده به سیال تخمین زده می‌شود. سپس با حل معادله رسانش دمای سطح سوخت بدست می‌آید و توان منتقل شده به سیال محاسبه و با مقدار حدس زده شده مقایسه می‌شود. در صورت تفاوت، این روند تکرار می‌شود تا معیار همگرایی برقرار شود.

۷-۵- شار حرارتی بحرانی

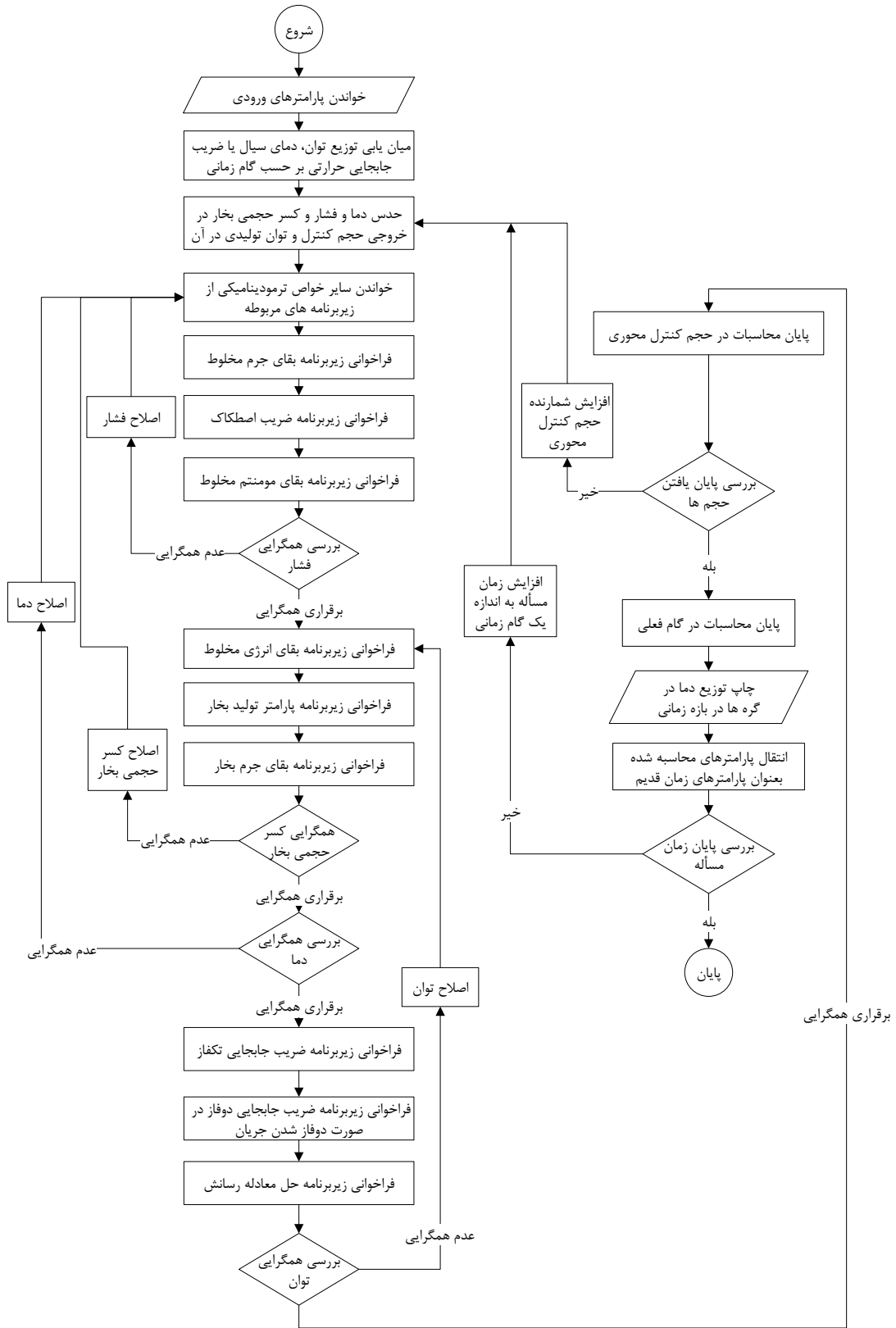
یکی از پارامترهایی که متأثر از شرایط سازه حرارتی و سیال است، شار حرارتی بحرانی می‌باشد. ایجاد شرایطی در مرز سیال و دیواره سازه حرارتی که باعث کاهش شدید ضریب انتقال حرارت جابجایی و به دنبال آن افزایش شدید دمای سطح دیواره شود را شار حرارتی بحرانی می‌گویند. این شرایط می‌تواند در هر یک از رژیم‌های جریان 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 [۲] ارائه شده است.

۷-۶- روندنمای مدل کانال

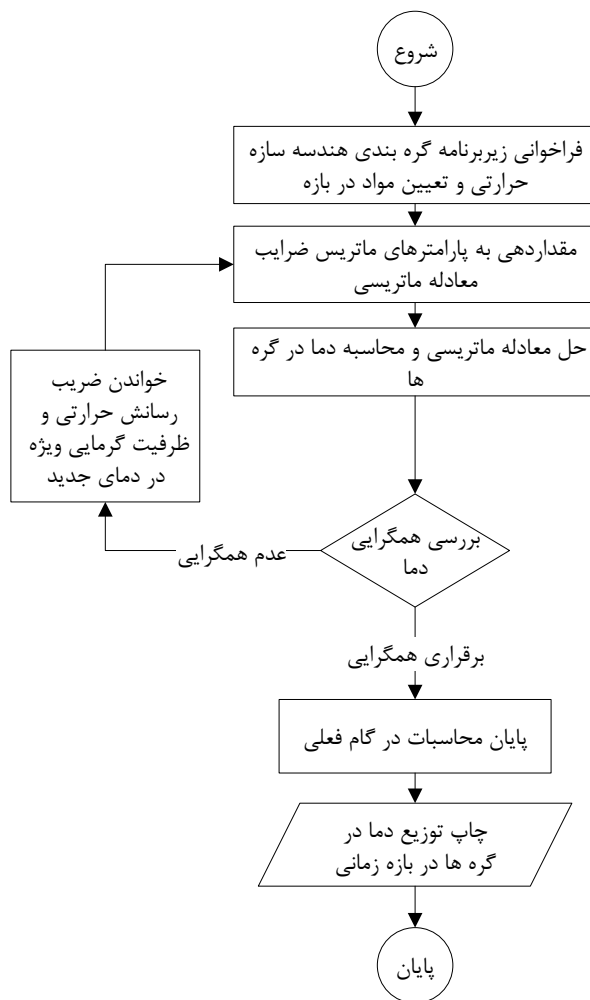
روندنمای برنامه کانال در حالت گذرا با مدل همگن در شکل ۲ و مدل شار رانشی در شکل ۳ و روندنمای مربوط به حل معادله رسانش حرارتی در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۲: روندنمای حل برنامه کانال با مدل دوفاز همگن



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



شکل ۴: روندنمای حل معادله رسانش حرارتی وابسته به زمان

۸- مدل تک حجم

تک حجم جزء پایه‌ی اجزای مختلف مدار ترموهیدرولیکی است. یک کانال می‌تواند بصورت یک سری تک حجم متصل به هم در نظر گرفته شود. به عبارت دیگر تک حجم لوله یا 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، و 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 استفاده شده است.

روابط و معادلات بکار رفته در مدل تک حجم شامل معادلات بقای جرم، مومنتم و انرژی و روابط کمکی محاسبه ضریب اصطکاک است. این روابط و معادلات مشابه روابط و معادلات بکار رفته در مدل کانال هستند. در این مدل زیربرنامه کانال پس از غیرفعال سازی بخش‌های غیر لازم مانند سازه حرارتی، فراخوانده می‌شود.

۹- مدل اتصال

در کد LOOP-I یک اتصال به منظور اتصال اجزای مختلف مدار ترموهیدرولیکی استفاده می‌شود. اما در کد LOOP2.0 که در این پروژه ارائه گردیده است، هر جزء خود اتصالات ورودی و خروجی خود را به همراه دارد. بنابراین در کد LOOP2.0، مدل اتصال شامل محاسبه فشار و سرعت با توجه به نوع اتصال، شرایط سیال در خروجی حجم مبدأ و ضریب افت فشار است. در این مدل، اتصالات مختلفی لحاظ 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. لازم به ذکر است ضرایب افت اتصالات بکار رفته در این مدل از نتایج تجربی ارائه شده در مرجع [۶] استخراج شده است. در صورتیکه اتصال مورد نظر کاربر در این مدل لحاظ نشده است، می‌تواند ضریب افت را به دلخواه وارد کند. این گزینه برای اتصالاتی دیگر که در این مدل لحاظ نشده‌اند، قابل استفاده است.

۹-۱- 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. مقدار اندازه گیری شده افت معمولاً بصورت نسبت افت هد جریان عبوری از جزء به هد سرعت در مدار تعریف می‌شود.

$$K = \frac{h_m}{V^2/2g} = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho V^2} \quad (۹-۱)$$

در این رابطه، K ضریب افت، h_m هد جریان، V سرعت، g شتاب جاذبه، Δp اختلاف فشار دو سر مقطع و ρ 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 دارسی است. در این رابطه، طولی از لوله که افتی معادل اتصال مورد نظر دارد، با توجه به ضریب افت بدست می‌آید.

$$h_m = f \frac{L_{eq}}{d} \frac{V^2}{2g} = K \frac{V^2}{2g}, \quad (۹-۲)$$

$$L_{eq} = \frac{Kd}{f}$$

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

۹-۲- اجزای مختلف تک اتصال

۹-۲-۱- اتصال ساده

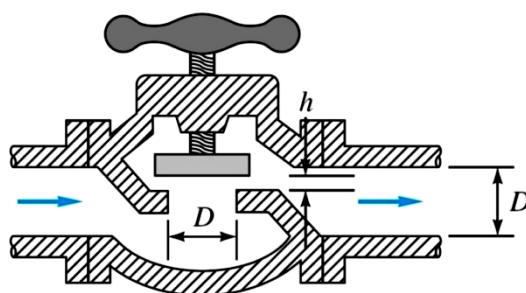
در اتصال ساده دو جزء از مدار بدون تغییر مقطع جریان به یکدیگر متصل می‌شوند و کاربر می‌تواند ضریب افت فشار اتصال را به دلخواه تعیین کند.

۹-۲-۲- شیرها

شیرها اتصالات مرسوم کنترل و تنظیم جریان سیال می‌باشند و در هر مدار ترموهیدرولیکی بکار می‌روند. شیرها انواع گوناگونی دارند. برخی از انواع شیرها که ضرایب افت آنها در دسترس بوده است، در برنامه لحاظ شده‌اند. برای هر شیر دو نوع اتصال پیچی^۱ و و لبه‌دار^۲ 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:

۹-۲-۲-۱- شیر فلکه

شیر فلکه^۳ 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 ۵ نشان داده شده است. اگر شیر کمی باز باشد باید ضریب افت متناظر با آن حالت توسط کاربر تعیین شود.

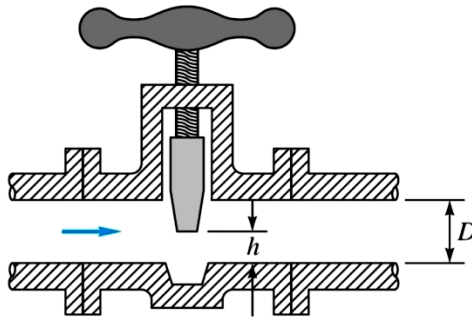


شکل ۵: نمای برش طولی از یک شیر فلکه

۹-۲-۲-۲- شیر دریچه‌ای

شیر دریچه‌ای^۴ 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 ۶ نشان داده شده است.

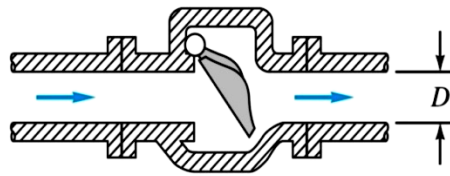
- ۱ - Screwed
- ۲ - Flanged
- ۳ - Globe valve
- ۴ - Gate valve



شکل ۶: نمای برش طولی از یک شیر دریچه‌ای

۹-۲-۲-۳- شیر یک طرفه

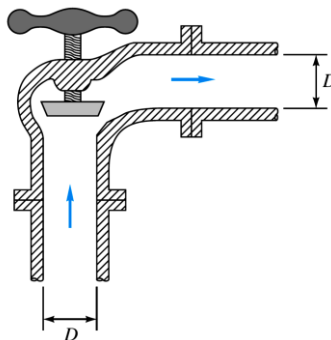
شیر یک طرفه^۱ برای ممانعت از برگشت جریان در مدارها استفاده می‌شود. این شیر زمانی که جریان سیال همسو با جهت اصلی شیر باشد باز و زمانی که غیر همسو باشد بسته است. نمایی از یک شیر یک طرفه در شکل ۷ نشان داده شده است.



شکل ۷: نمای برش طولی از یک شیر یک طرفه

۹-۲-۲-۴- شیر زاویه‌ای

شیر زاویه‌ای^۲ 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 زاویه‌ای در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸: نمای برش طولی از یک شیر زاویه‌ای

۱ - Check valve

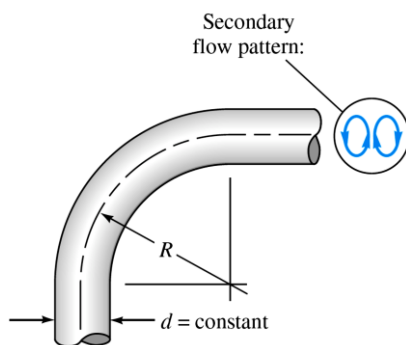
۲ - Angle valve

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 و لبه‌دار 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.

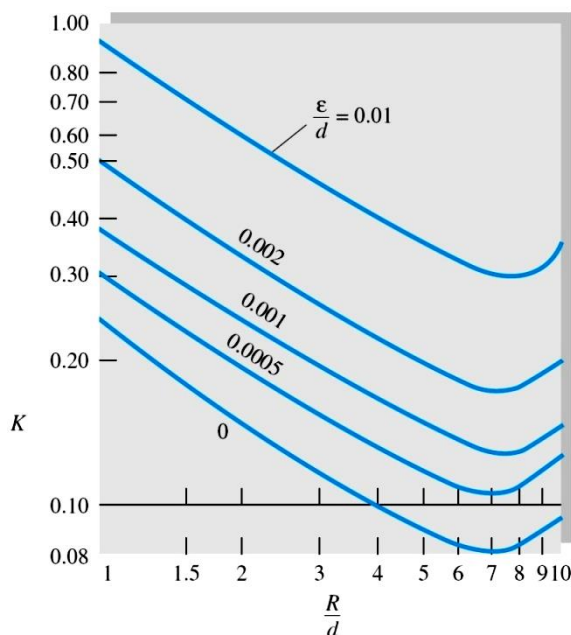
جدول شماره ۱: ضریب افت فشار برای برخی شیرها و اتصالات زاویه‌دار

	Nominal diameter (in)									
	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	

برای تعیین ضریب افت فشار دقیق‌تر در زانویی به دو پارامتر نسبت شعاع انحنا زانویی به قطر لوله و نسبت زبری به قطر لوله نیاز است. در این بخش ضرایب افت فشار برای زانویی‌های ۹۰ درجه با نسبت شعاع انحنا به قطر برابر ۱ و بیشتر قابل محاسبه است. در شکل ۹ نمایی از یک زانویی ۹۰ درجه با شعاع انحنا بزرگ نشان داده شده است. در شکل ۱۰ ضرایب افت فشار بر حسب نسبت‌های شعاع انحنا و زبری زانویی نشان داده شده است. در اینجا بدلیل اینکه زانویی دارای طول قابل توجهی است، زبری سطح پارامتری تأثیرگذار در افت فشار خواهد بود. 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.



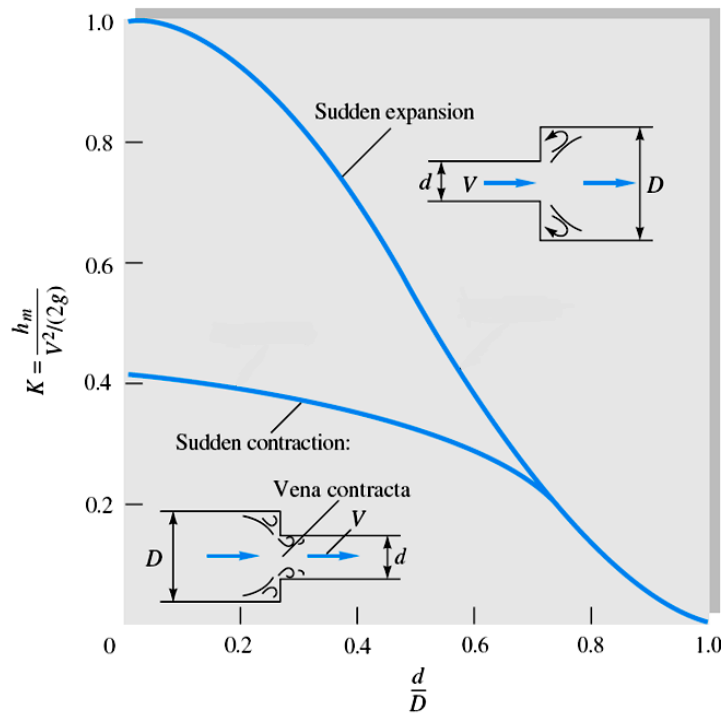
شکل ۹: نمایی از زانویی ۹۰ درجه با شعاع انحنای بزرگ



شکل ۱۰: تغییرات ضریب افت فشار در زانویی با شعاع انحنای بزرگ

۹-۲-۵- تغییر مقطع ناگهانی

یکی از اتصالات متداول در اجزای مختلف مدار، اتصال اجزای با سطح 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 کوچکتر از ۰/۷ برای 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 ۱۱ مشاهده کرد.



شکل ۱۱: تغییرات ضریب افت فشار برای انقباض و انبساط ناگهانی جریان بر حسب نسبت قطرها

۹-۲-۶- تغییر مقطع ملایم

در صورتیکه تغییر مقطع جریان ملایم و تدریجی باشد، ضریب افت کاملاً متفاوت است. شکل ۱۲ 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.

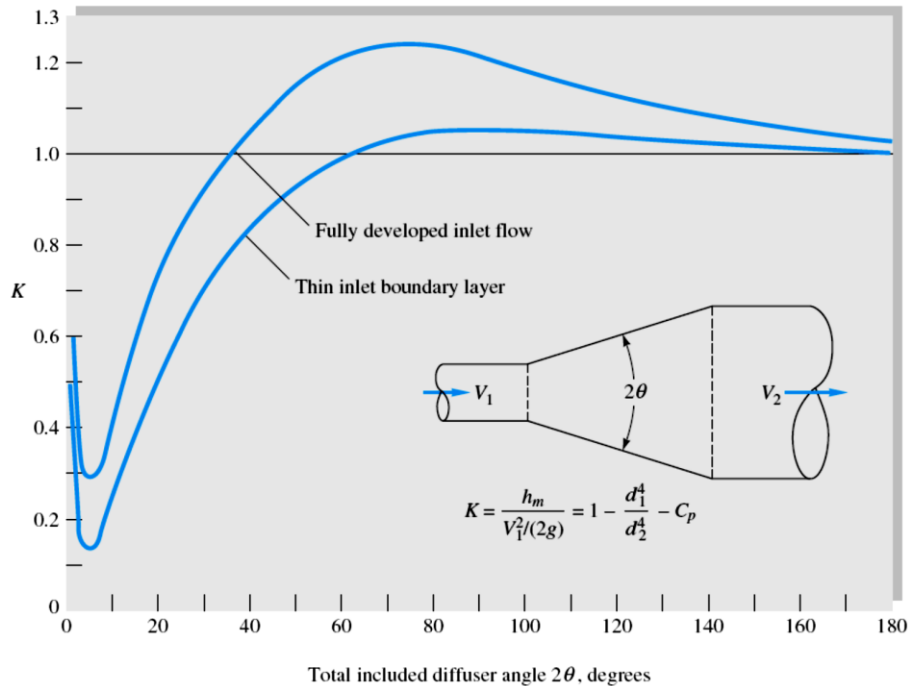
$$C_p = \frac{P_2 - P_1}{\frac{1}{2} \rho V_1^2} \quad (3-9)$$

در این رابطه، C_p ضریب بازیاب دیفیوزر، P_1 و P_2 فشار خروجی و ورودی اتصال، ρ 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 بیشتر خواهد داشت. ارتباط ضریب بازیاب و ضریب افت بصورت زیر است:

$$K = 1 - \frac{d_1^4}{d_2^4} - C_p \quad (4-9)$$

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 ۱۲ 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 ۱۲: 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.

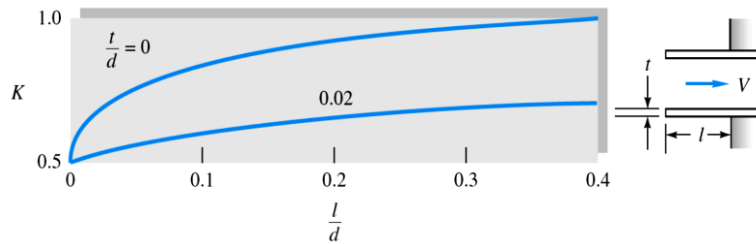
جدول شماره ۲: نمونه ضریب افت فشار در مقطع انقباض جریان ملایم

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

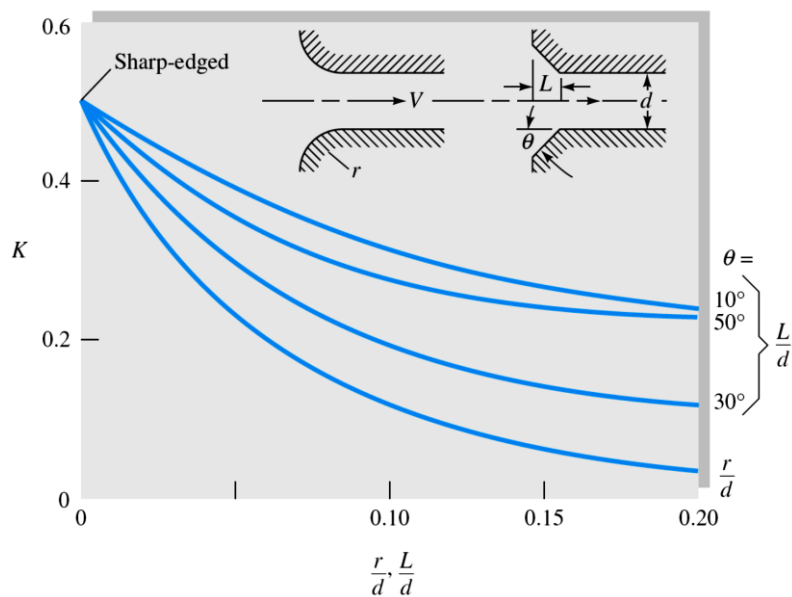
۹-۲-۷- اتصالات خروجی با تغییر مقطع بزرگ

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 ۱۳ و شکل ۱۴ 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.



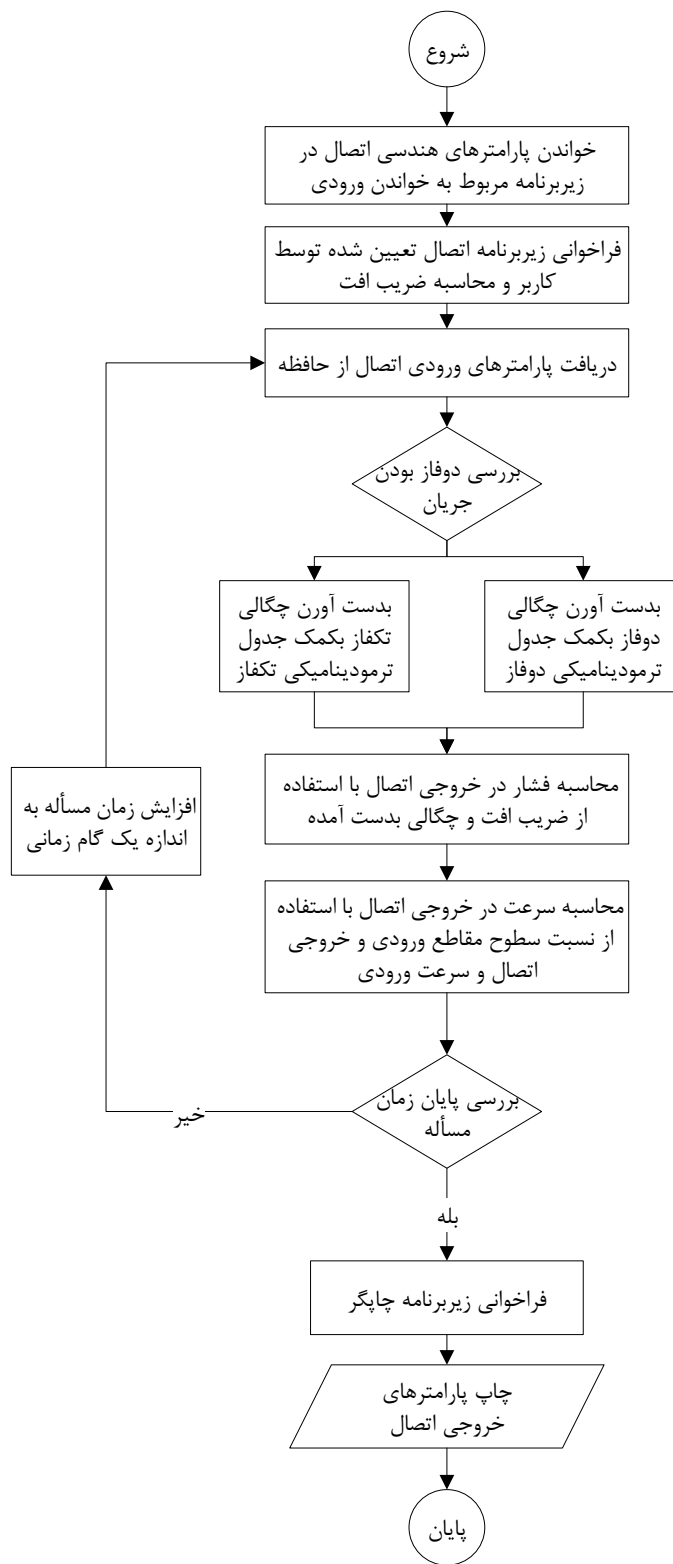
شکل ۱۳: خروجی با لبه متداخل و ضریب افت فشار برحسب طول بخش متداخل به قطر



شکل ۱۴: خروجی با لبه زایه‌دار و لبه گرد شده و ضریب افت فشار

۹-۳- روندنمای مدل اتصال

روندنمای برنامه اتصال در حالت گذرا در شکل ۱۵ نشان داده شده است. محاسبات در حالت گذرا از مقادیر حالت پایا شروع می‌شود. مقادیر حالت پایا با در نظر گرفتن عدم تغییر پارامترهای ورودی کد در اولین گام زمانی حاصل می‌شود.



شکل ۱۵: روندنمای مدل اتصال

۱۰- مدل پمپ

مدل‌سازی پمپ با استفاده از منحنی‌های مشخصه‌ی هد و گشتاور آن، انجام می‌پذیرد. این منحنی‌ها که توسط کارخانه سازنده پمپ ارائه می‌شوند، 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^۱ پمپ توسط شرکت سازنده آن در منحنی‌های چهار ناحیه‌ای مرجع داده شده است. برای استفاده در کد RELAP5 و کد LOOP2.0 منحنی چهار ناحیه‌ای باید به فرم فشرده‌تری تبدیل شود که به این فرم‌ها منحنی داده‌های متشابه^۲ گفته می‌شود. این منحنی‌ها با بی‌بعد سازی مقادیر واقعی هد، گشتاور، جریان حجمی و سرعت دورانی نسبت به مقادیر مجاز^۳، 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.

۱-۱۰- 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^۴ بدست می‌آیند عبارتند از:

$$\pi_1 = \frac{Q}{vD} \quad (1-10)$$

$$\pi_2 = \frac{NQ^{\frac{1}{2}}}{(gH)^{\frac{3}{4}}} \quad (2-10)$$

$$\pi_3 = \frac{Q}{ND^3} \quad (3-10)$$

۱ - Characteristic Curve

۲ - Homologous Curve

۳ - Rated

۴ - Buckingham's Pi

در این روابط N سرعت دورانی بر حسب rpm ، Q جریان حجمی بر حسب gpm ، H هد بر حسب ft ، g شتاب گرانش بر حسب $\frac{ft}{hr^2}$ ، لزجت سینماتیکی و D قطر پروانه پمپ بر حسب ft می‌باشد. چهارمین پارامتر از ترکیب پارامترهای π_2 و π_3 به دست می‌آید:

$$\pi_4 = \frac{gH}{N^2 D^2} \quad (4-10)$$

پارامتر π_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 می‌آیند. بخصوص در موارد جریان رینولدز بالا این تأثیر کمتر است، به همین دلیل عملاً عدد بی‌بعد π_1 کاربردی نخواهد داشت.

از پارامترهای π_2 ، π_3 و π_4 برای بدست آوردن کارایی پمپ استفاده می‌شود. پارامتر π_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 ساده می‌شود.

$$N_s = \frac{NQ^{\frac{1}{2}}}{H^{\frac{3}{4}}} \quad (5-10)$$

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:

$$Q_s = \frac{Q}{ND^3} \quad (6-10)$$

$$H_s = \frac{H}{N^2 D^2} \quad (7-10)$$

زمانی که عملکرد گشتاور هم در نظر گرفته شود، پارامتر بی‌بعد دیگری بصورت گشتاور بی‌بعد تعریف می‌شود:

$$\pi_5 = \frac{\tau}{\rho N^2 D^5} \quad (8-10)$$

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

$$\pi_5 = \frac{\tau}{N^2 D^5} \quad (9-10)$$

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.

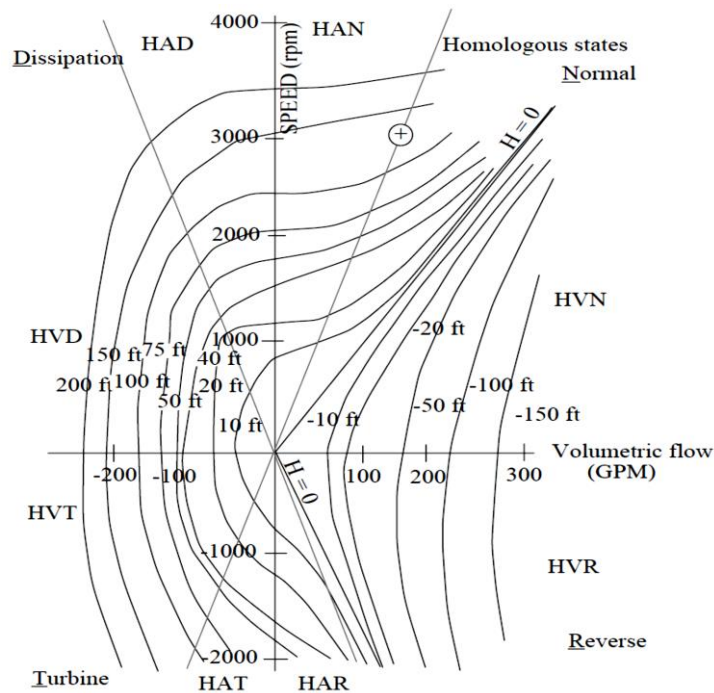
شکل ۱۶ نمودار چهار ناحیه‌ای هد پمپ‌های MOD1 متشابه را که در مرجع [۲] معرفی شده‌اند، نشان می‌دهد. در این نمودار خطوط هد ثابت برای مقادیر مستقل سرعت و جریان نشان داده شده است. شکل ۱۷ نیز نمودار چهار ناحیه‌ای گشتاور را برای پمپ‌های MOD1 نشان می‌دهد. در نمودار هد تمامی نقاط خطوط هد ثابت در مبدأ دارای ظرفیت 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 α و محدوده تعریف شده در جدول، می‌توان مقادیر h و β را بدست آورد. نمودار شکل ۱۶ در دو مرحله به منحنی‌های متشابه تبدیل می‌شود. ابتدا با استفاده از مقادیر مجاز هد H_R ، گشتاور τ_R ، جریان Q_R و سرعت N_R مقادیر نمودار به ترتیب با

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

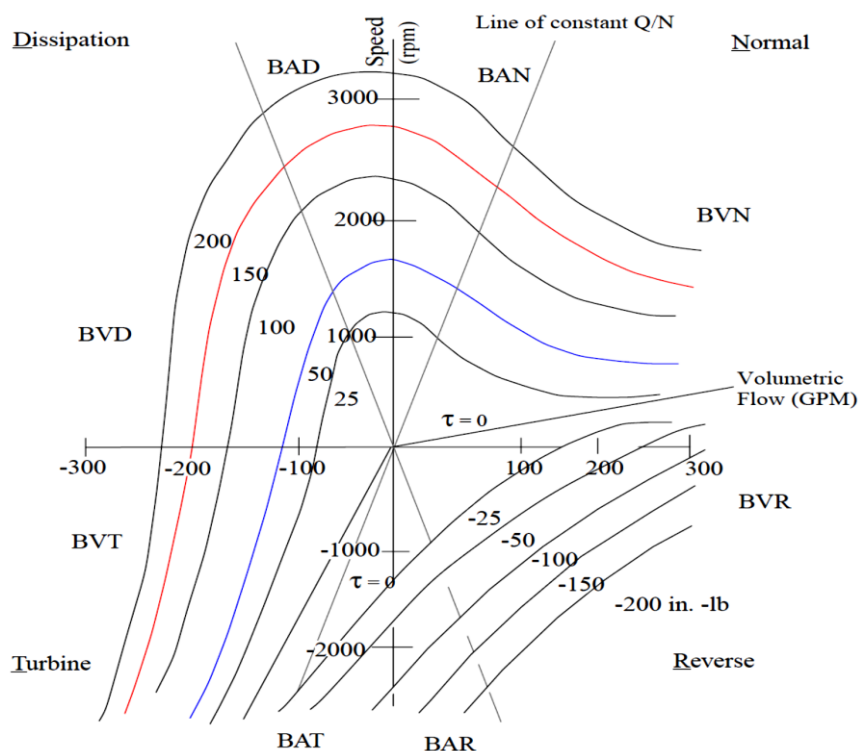
یا $\frac{h}{v^2}$ و $\frac{\beta}{\alpha^2}$ یا $\frac{\beta}{v^2}$ رسم می‌شوند. استفاده از هر یک از پارامترها وابسته به $\frac{v}{\alpha}$ ابتدایی است. شکل ۱۸ منحنی هد متشابه که از نمودار

شکل ۱۶ به دست آمده است را نشان می‌دهد. شکل ۱۹ منحنی گشتاور متشابه که از نمودار شکل ۱۷ بدست آمده است را نشان می‌دهد.

در مدل پمپ زوج مرتبه‌ای که نمودارهایی همانند نمودارهای شکل ۱۸ و شکل ۱۹ توسط شرکت‌های سازنده پمپ ارائه می‌شود، بعنوان داده‌های ورودی از کاربر گرفته شده و بر اساس میانمایی خطی بین این زوج مرتبه‌ها، هد و گشتاور پمپ در شرایط مسأله تعیین می‌گردد.



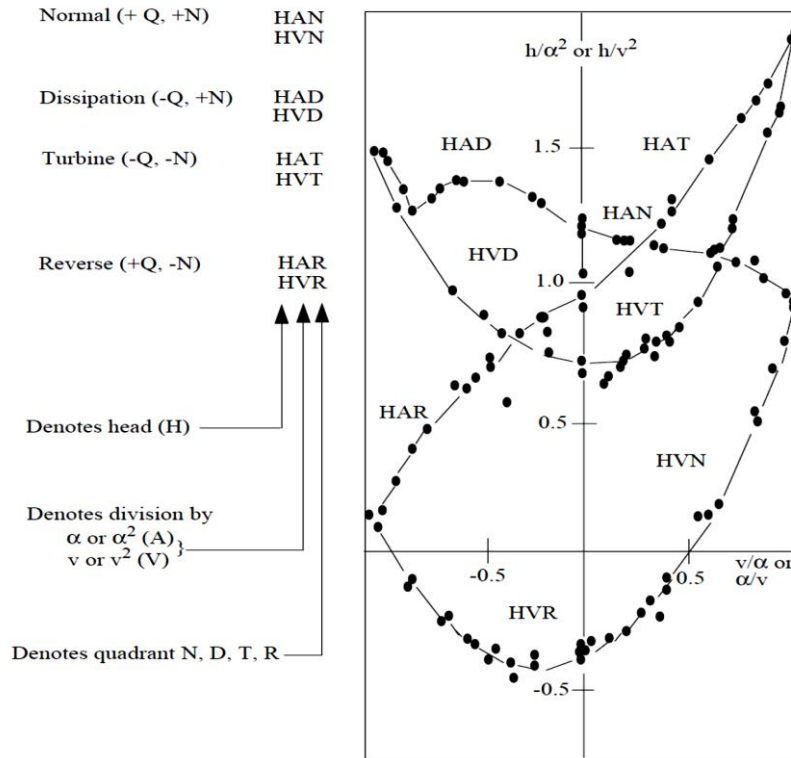
شکل ۱۶: منحنی هد چهار ناحیه‌ای برای پمپ‌های MOD1 (ANC-A-2083) [۲]



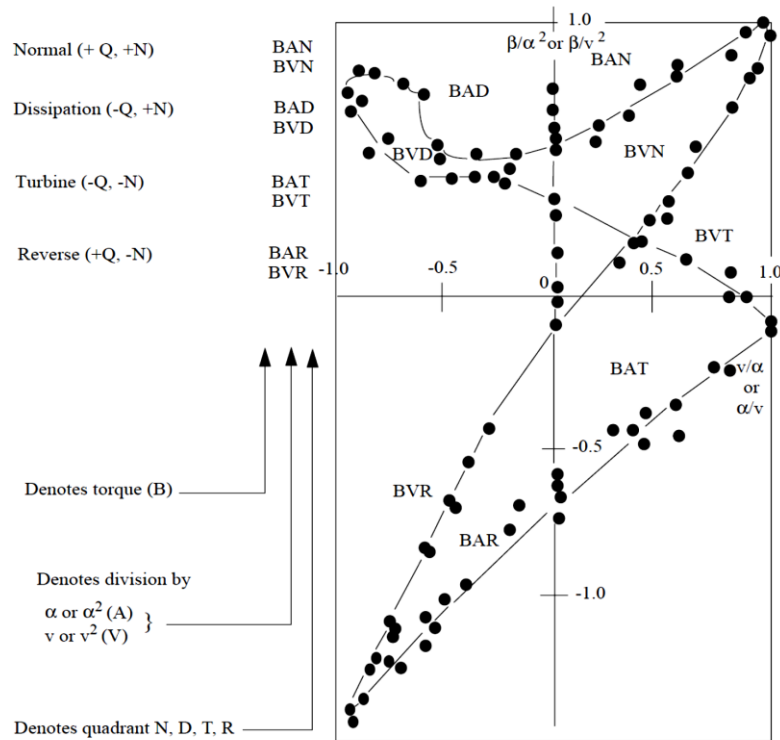
شکل ۱۷: منحنی چهار ناحیه‌ای گشتاور را برای پمپ‌های MOD1 (ANC-A-3449) [۲]

جدول شماره ۳: تعریف پارامترهای منحنی‌های متشابه پمپ

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



شکل ۱۸: منحنی متشابه هد بر اساس پارامترهای بی بعد



شکل ۱۹: منحنی متشابه گشتاور بر اساس پارامترهای بی بعد

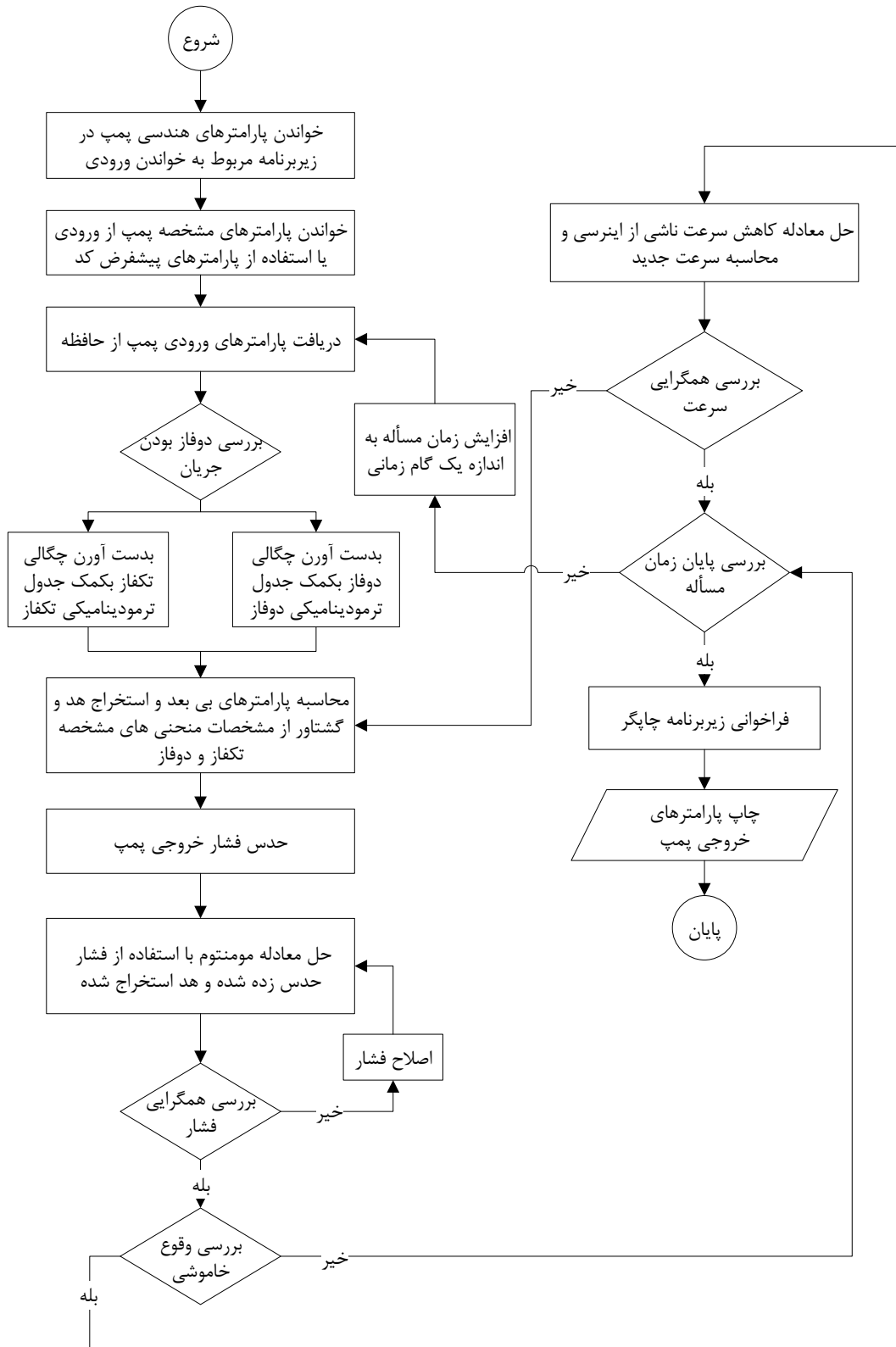
۱۰-۲- روندنمای مدل پمپ

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 α ، β ، ν 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 (۱۰-۱۰) و (۱۱-۱۰) مقدار هد و گشتاور محاسبه می‌شود. مقادیر M_H و M_τ برای حالت تکفاز برابر صفر می‌باشند.

$$H = H_{1\Phi} + M_H (\alpha_g) \Delta H \quad (10-10)$$

$$\tau = \tau_{1\Phi} + M_\tau (\alpha_g) \Delta \tau \quad (11-10)$$

در مرحله بعد معادله مومنتم حل شده و فشار خروجی به دست می‌آید. در شکل ۲۰ روندنمای مدل پمپ نشان داده شده است. در این کد علاوه بر افزودن قابلیت حل حالت گذرا در پمپ، قابلیت لحاظ خاموشی پمپ و محاسبه سرعت پس از خاموشی بر اساس ممان اینرسی پمپ نیز لحاظ شده است.



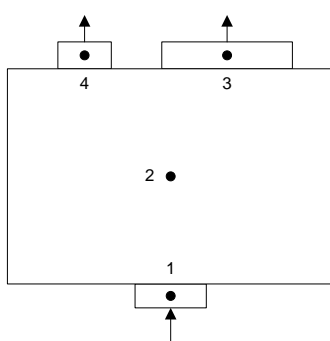
شکل ۲۰: روندنمای مدل پمپ

۱۱- مدل انشعاب

انشعاب برای اتصال بین چند جزء هیدرودینامیکی مدار مورد استفاده قرار می‌گیرد. یک انشعاب از یک تک‌حجم 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.

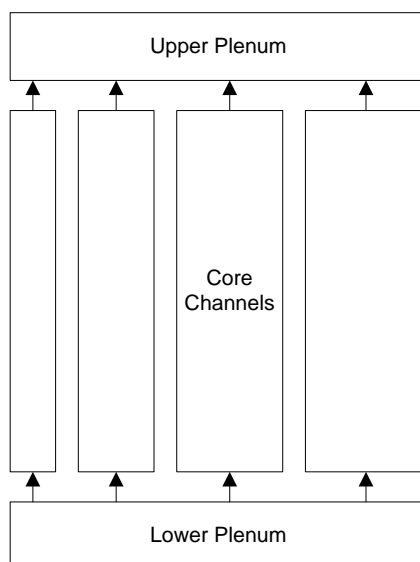
فرضیات بکار رفته بخش انشعاب عبارتند از:

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 تک‌حجم 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 ۲۱ 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 ۲۱: نمایی از یک انشعاب با یک ورودی و دو خروجی

در این فرض فشار در موقعیت دو نقطه ۳ و ۴ در شکل ۲۱ یکسان فرض می‌شوند. برای توضیح کاربرد این فرض می‌توان قلب راکتور شامل بخش پایینی^۱، کانال‌های قلب^۲ و بخش بالایی^۳ را در نظر گرفت. در شکل ۲۲ نمایی از این راکتور فرضی نشان داده شده است. بخش 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 ۲۲: نمایی از راکتور فرضی با بخش پایینی، کانال‌های قلب و بخش بالایی

در مدل توسعه داده شده 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 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.

۱۱-۱- محاسبات مدل انشعاب

در مدل انشعاب ابتدا میانگین پارامترهای ورودی مانند دما، فشار و سرعت محاسبه و بعنوان پارامترهای میانگین ورودی به یک تک‌حجم در نظر گرفته می‌شوند. دمای میانگین ورودی بصورت میانگین وزن دهی شده توسط دبی هر اتصال ورودی بدست می‌آید. معیار متوسط گیری رابطه (۱-۱۱) انرژی حرارتی است. در این رابطه از اندک تفاوت ظرفیت گرمایی در ورودی‌ها صرف نظر شده است.

۱ - Lower Plenum
۲ - Core Channels
۳ - Upper Plenum

$$\bar{T}_{in} = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{m}_i T_i}{\sum_{i=1}^n \dot{m}_i} \quad (1-11)$$

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 تأثیرگذار 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:

$$A_i^B = \frac{A_i A_B}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (2-11)$$

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:

$$V_i^B = V_i \frac{A_i}{A_i^B} \quad (3-11)$$

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. معیار محاسبه سرعت متوسط ورودی بر اساس دبی جرمی با صرف نظر کردن از اندک تفاوت چگالی سیال در ورودی‌های انشعاب است.

$$\bar{V}_{in} = \frac{\sum_{i=1}^n V_i^B A_i^B}{\sum_{i=1}^n A_i^B} \quad (4-11)$$

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:

$$P_i^B = P_i - k_{loss} \frac{\rho_i V_i^2}{2} \quad (5-11)$$

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 (انقباض مقطع)، ρ_i چگالی در هر اتصال ورودی است.

فشار میانگین ورودی بصورت میانگین خطی فشارهای سیال در آستانه ورودی در نظر گرفته می‌شود:

$$\bar{P}_{in} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i^B}{n} \quad (6-11)$$

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 میانگین‌گیری، 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.

$$\bar{X}_{in} = \frac{\sum_{i=1}^n \dot{m}_i X_i}{\sum_{i=1}^n \dot{m}_i} \quad (7-11)$$

پس از متوسط‌گیری پارامترها در ورودی انشعاب، بخش تک‌حجم 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 ۲۱، می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$\frac{P_2}{\rho_2 g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 = \frac{P_3}{\rho_3 g} + \frac{V_3^2}{2g} + Z_3 + h_{l3} \quad (8-11)$$

و بین دو نقطه ۲ و ۴:

$$\frac{P_2}{\rho_2 g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 = \frac{P_4}{\rho_4 g} + \frac{V_4^2}{2g} + Z_4 + h_{l4} \quad (9-11)$$

پارامترهای روابط فوق عبارتند از: P : فشار، ρ : 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:

$$\frac{V_3^2}{2g} + h_{l3} = \frac{V_4^2}{2g} + h_{l4} \quad (10-11)$$

از طرف دیگر با استفاده از رابطه (۹-۱) رابطه سرعت بین دو نقطه بصورت زیر حاصل می‌شود:

$$V_4 = V_3 \sqrt{\frac{1+k_{loss3}}{1+k_{loss4}}} \quad (11-11)$$

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:

$$V_B^{out} A_B = \sum_{i=1}^n V_i^{out} A_i^{out} \quad (12-11)$$

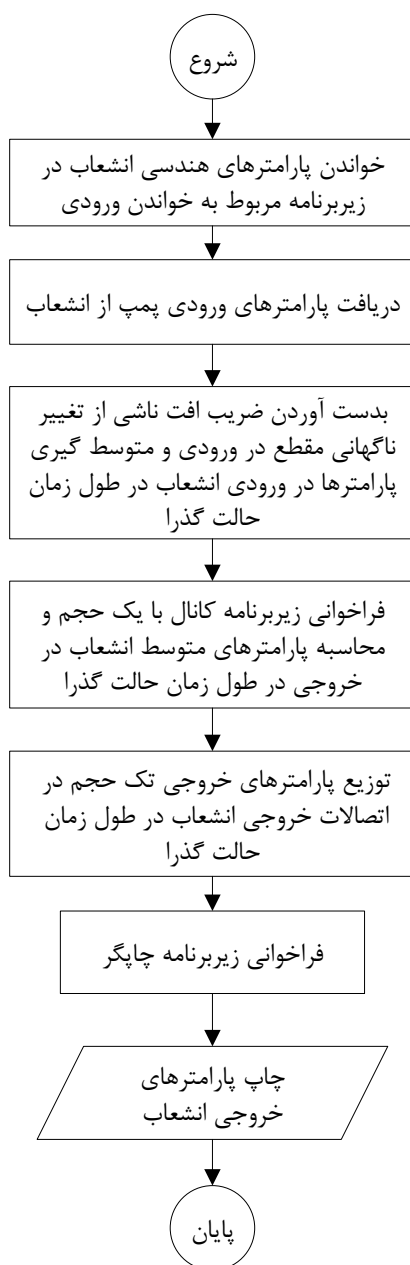
در این رابطه، V_B^{out} سرعت خروجی محاسبه شده توسط مدل تک‌حجم، A_B سطح مقطع انشعاب، V_i^{out} سرعت در هر خروجی انشعاب و A_i^{out} سطح مقطع هر اتصال خروجی انشعاب است. با استفاده از دو رابطه (۱۱-۱) و (۱۲-۱) سرعت در هر اتصال خروجی انشعاب محاسبه می‌گردد.

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

$$P_i^{out} = P_B^{out} - k_{loss_i} \frac{\rho_B^{out} (V_B^{out})^2}{2} \quad (13-11)$$

۱۱-۲- روندنمای مدل انشعاب

محاسبات مدل انشعاب شامل سه بخش است. بخش میانگین‌گیری پارامترهای ورودی و تعیین پارامتر متوسط ورودی، بخش محاسبات تک‌حجم و بخش توزیع پارامترهای خروجی مدل تک‌حجم در اتصالات خروجی انشعاب. این سه بخش در روندنمای مدل انشعاب در شکل ۲۳ نشان داده شده است.



شکل ۲۳: روندنمای مدل انشعاب

۱۲- 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 مدل سازی 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 دوفاز در بخش ثانویه برای به دست آوردن شرایط سیال در خروجی هر حجم در هر بخش حل می‌شوند.

۱-۱۲- فرضیات مدل سازی 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 جریان 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.
- بدلیل حجم بالای محاسبات و زمان طولانی حل، در هر گام زمانی محاسبات حالت پایا برای بدست آوردن شرایط در آن گام زمانی حل می‌شود.

۱۲-۲- 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

$$\rho_i v_i = \rho_o v_o \Rightarrow v_o = \frac{\rho_i v_i}{\rho_o} \quad (1-12)$$

معادله مومنتم برای بدست آوردن فشار سیال خروجی هر حجم

$$P_{out} = P_{in} + \rho_{m,out} v_{out}^2 - \rho_{m,in} v_{in}^2 - \frac{f \rho_{m,out} v_{ave}^2}{2D_e} \Delta z - \rho_{m,out} g \Delta z \quad (2-12)$$

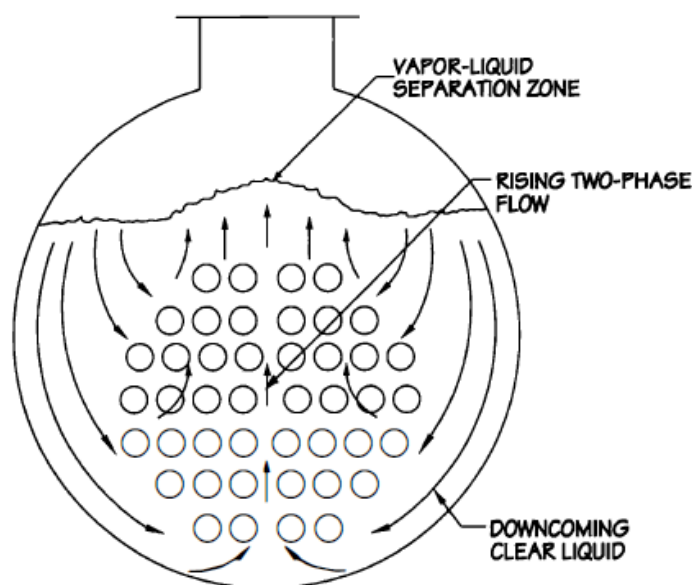
معادله انرژی برای بدست آوردن آنتالپی سیال خروجی هر حجم

$$h_{out} = h_{in} + \frac{q P_h \Delta z}{\rho_m v_{ave} A_z} + \frac{1}{\rho_m} p_{out} - p_{in} + \frac{f v_{ave}^2 \Delta z}{2D_e} \quad (3-12)$$

پارامتر P_h در رابطه (۳-۱۲) 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.

۳-۱۲- مدل‌سازی بخش ثانویه (پوسته)

الگوی گردش جریان سیال در یک مولد بخار در شکل ۲۴ 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 ۲۴: 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.

۱-۳-۱۲- جوشش با جابجایی اجباری

در شرایط جوشش با جریان اجباری، رشد و جدایی حباب بشدت 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.

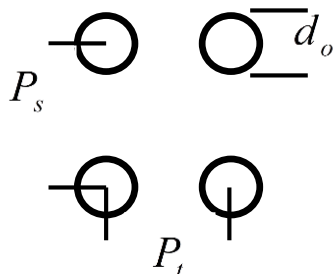
به دلیل تماس سطح لوله با مایع، افزایش ضریب انتقال حرارت در جریان حبابی و خصوصاً در جریان حلقوی رخ می‌دهد. در ادامه‌ی جریان حلقوی، نقاط خشک روی سطح داخلی ظاهر می‌شود و ضریب انتقال حرارت شروع به کاهش می‌کند. مرحله گذار، با پیدایش نقاط خشک شروع و تا جایی ادامه می‌یابد که سطح کاملاً خشک شود و تمام مایع باقیمانده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

۱۲-۳-۲- 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 (۴-۱۲) بر اساس هندسه چیدمان لوله‌های مولد بخار بصورت زیر محاسبه می‌شود.

$$D_h = \frac{4}{\pi d_o} \left(P_t P_s - \frac{\pi d_o^2}{4} \right) \quad (4-12)$$

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 ۲۵ نشان داده شده‌اند.



شکل ۲۵: فاصله افقی و عمودی بین لوله‌های مولد بخار

۱۲-۳-۳- افت فشار اصطکاک

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 برای کانال و تک‌حجم به دست آمده است.

۱۲-۳-۴- ضریب انتقال حرارت دوفاز

پیش‌بینی دقیق ضریب انتقال حرارت برای سیال تکفاز با خطای 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 [۷].

$$h_{2\phi} = Sh_{nb} + Fh_{conv} \quad (5-12)$$

در این رابطه h_{conv} ، ضریب انتقال حرارت تکفاز، S فاکتور منع رشد حباب^۱ است که از رابطه (۶-۱۲)، h_{nb} ، ضریب انتقال حرارت جوش هسته‌ای است که از رابطه (۸-۱۲) و F ضریب اصلاح عدد رینولدز دوفاز مؤثر است که از رابطه (۹-۱۲) بدست می‌آیند.

$$S = \frac{k_l}{h_{conv} X_0} \left(1 - e^{-\frac{h_{conv} X_0}{k_l}} \right) \quad (6-12)$$

در این رابطه، k_l ضریب رسانش مایع و X_0 ، از رابطه (۷-۱۲) بدست می‌آید.

$$X_0 = 0.041 \left(\frac{g_c \sigma}{g (\rho_l - \rho_g)} \right) \quad (7-12)$$

در این رابطه، σ کشش سطحی، ρ چگالی، g_c ضریب تبدیل شتاب جاذبه برابر ۳۲/۱۸ و g شتاب جاذبه است.

$$h_{nb} = Aq^b \quad (8-12)$$

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 ۵/۱ و ۰/۶۷۳ می‌باشند. q ، شار حرارتی منتقل شده از لوله‌ها به سیال ثانویه است.

$$F = (\phi_l^2)^{\frac{n}{2-m}} \quad (9-12)$$

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 ۰/۶۳ و ۰/۲۵ می‌باشند. ϕ_l^2 ضریب اصطکاک دوفاز است و از رابطه (۱۰-۱۲) بدست می‌آید.

$$\phi_l^2 = \frac{\Delta P_{2\phi,fric}}{\Delta P_{1,fric}} \quad (10-12)$$

در رابطه (۱۰-۱۲)، $\Delta P_{2\phi,fric}$ ، افت فشار اصطکاکی جریان دوفاز و $\Delta P_{1,fric}$ ، افت فشار اصطکاکی مایع است. برای به دست آوردن ϕ_l^2 رابطه (۱۱-۱۲) پیشنهاد شده است. x_{tt}^2 ضریب Lockhart-Martinelli است و از رابطه (۱۲-۱۲) بدست می‌آید.

$$\phi_l^2 = 1 + \frac{C}{x_{tt}} + \frac{1}{x_{tt}^2} \quad (11-12)$$

$$x_{tt}^2 = \left(\frac{1-x}{x} \right)^{2-m} \left(\frac{\rho_g}{\rho_l} \right) \left(\frac{\mu_l}{\mu_g} \right)^m \quad (12-12)$$

در رابطه (۱۱-۱۲)، 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_{ff} کوچکتر از ۰.۲، برابر ۸ پیشنهاد شده است. در این کد نیز از این مقدار استفاده شده است.

در رابطه (۱۱-۱۲)، h_{conv} ، ضریب انتقال حرارت تکفاز است که بر اساس رابطه ناسلت (۱۳-۱۲) برای چیدمان مربعی لوله‌ها و رابطه (۱۲-۱۴) برای چیدمان شطرنجی بدست می‌آید.

$$Nu = 0.27 Re^{0.63} Pr^{0.36} \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0.25} \quad (13-12)$$

$$Nu = 0.35 \left(\frac{P}{D} \right)^{0.2} Re^{0.6} Pr^{0.3} \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0.25} \quad (14-12)$$

رابطه دیگری برای محاسبه ضریب انتقال حرارت تکفاز در بخش ثانویه در مرجع [۷] ارائه شده است. در این رابطه ضریب انتقال حرارت تکفاز از ضرب ضرایبی در ضریب جابجایی ایده‌آل بدست می‌آید.

$$h_{conv} = h_{id} J_c J_l J_b J_s J_r \quad (15-12)$$

ضریب جابجایی ایده‌آل از رابطه (۱۶-۱۲) به دست می‌آید.

$$h_{id} = j_j c_p \left(\frac{\dot{m}}{A} \right) \left(\frac{k}{c_p \mu} \right)^{2/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad (16-12)$$

در این رابطه j_j ضریبی است که از رابطه (۱۷-۱۲) به دست می‌آید. c_p ، ظرفیت گرمایی آب، \dot{m} ، دبی جرمی، A ، سطح محصور بین چهار لوله، k ، ضریب رسانش حرارتی آب، μ ، لزجت دینامیکی آب و μ_w ، لزجت دینامیکی آب در دمای سطح لوله‌ها است. با توجه به اینکه نسبت این دو لزجت نزدیک ۱ است و از طرف دیگر توزیع دما در دیواره لوله محاسبه نمی‌شود، نسبت این دو لزجت برابر ۱ در نظر گرفته شده است.

$$j_j = a_1 \left(\frac{1.33 d_o}{P_t} \right)^a (Re_s)^{a_2} \quad (17-12)$$

$$a = \frac{a_3}{1 + 0.14 (Re_s)^{a_4}} \quad (18-12)$$

ضرایب به کار رفته در روابط (۱۷-۱۲) و (۱۸-۱۲) در جدول شماره ۴ ارائه شده است.

جدول شماره ۴: ضرایب مورد نیاز برای محاسبه ضریب جابجایی حرارتی جریان تکفاز در بخش ثانویه مولد بخار [۷]

عدد رینولدز	a_1	a_2	a_3	a_4
$10^5 - 10^4$	0.37	-0.395	1.187	0.37
$10^4 - 10^3$	0.107	-0.266	1.187	0.37

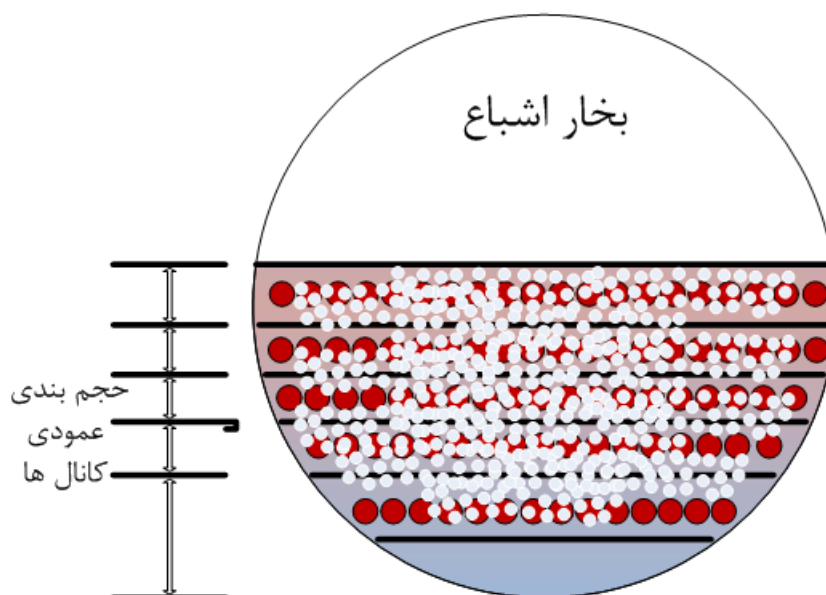
0.37	1.187	-0.460	0.408	$10^3 - 10^2$
0.37	1.187	-0.631	0.900	$10^2 - 10$
0.37	1.187	-0.667	0.970	10

ضرایب بکار رفته در رابطه (۱۲-۱۵) عبارتند از:

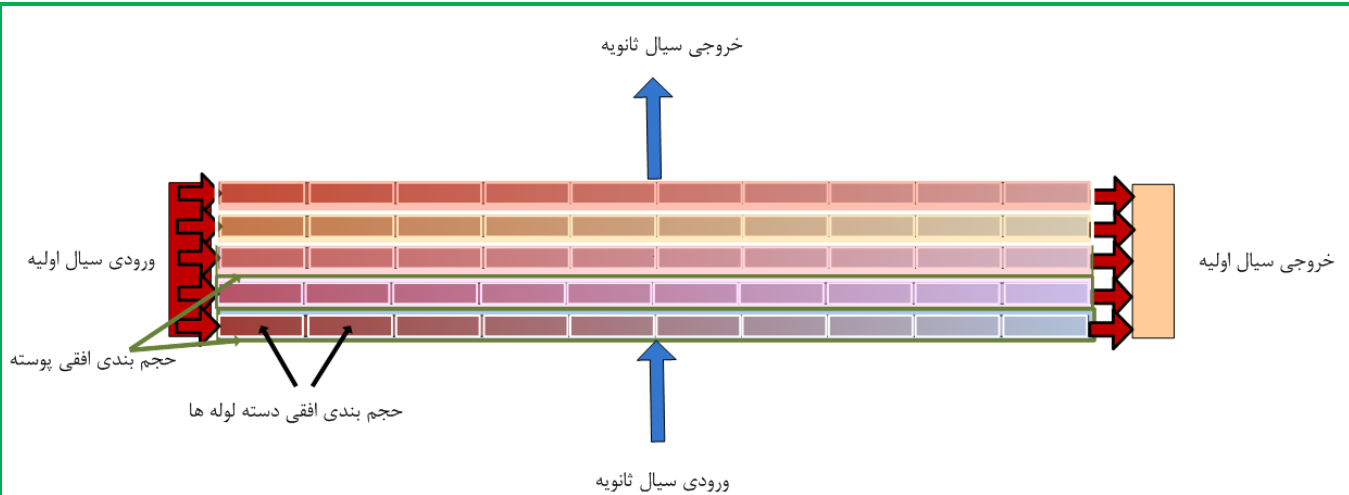
- (Je) - ضریب تصحیح اثر صفحات نگه دارنده دسته لوله‌ها برابر ۱ می‌باشد.
- (Jl) - ضریب تصحیح اثرات ناشی دیواره برابر ۰/۷۵ می‌باشد.
- (Jb) - ضریب تصحیح اثرات جریان‌های کنارگذر برابر ۰/۹ می‌باشد.
- (Js) - ضریب تصحیح فاصله متغیر دیواره برابر ۰/۹ می‌باشد.
- (Jr) - ضریب تصحیح عدد رینولدز کمتر از ۱۰۰ است. در اینجا $Re > 100$ بوده و در نتیجه این ضریب برابر ۱ می‌باشد.

۴-۱۲ - حجم‌بندی مولد بخار

حجم‌بندی در نظر گرفته شده مطابق شکل ۲۶ و شکل ۲۷ 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.



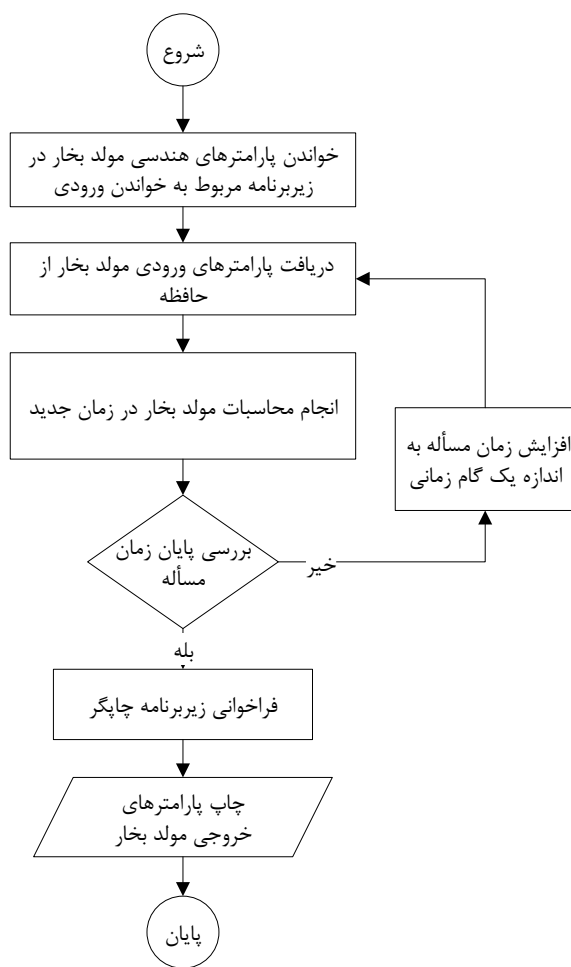
شکل ۲۶ : حجم‌بندی دسته لوله‌ها در راستای عمودی (هر کانال یک حجم در بخش پوسته و لوله)



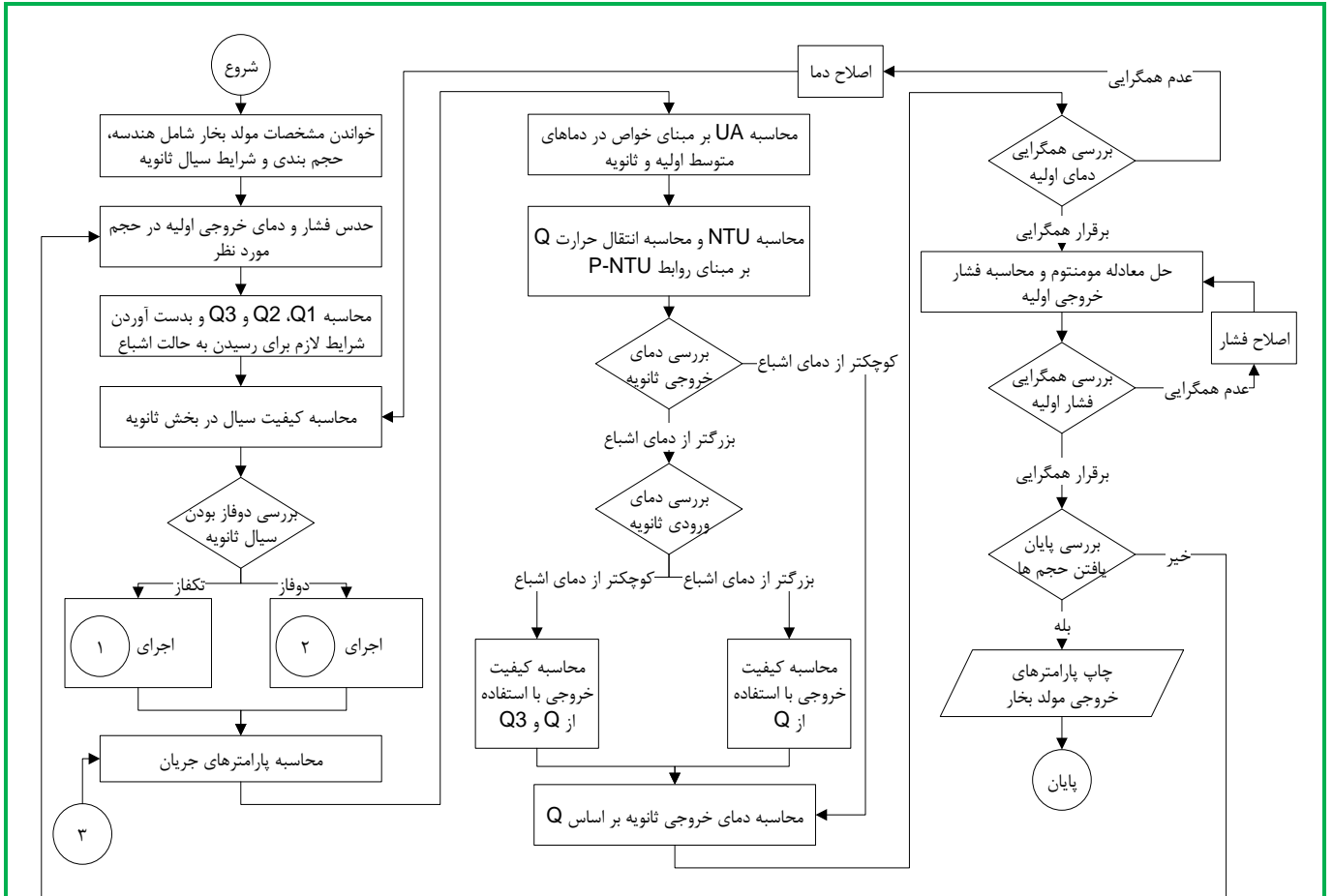
شکل ۲۷: حجم‌بندی دسته لوله‌ها در راستای افقی

۱۲-۵- روندنمای اجرای برنامه و مدل‌سازی مبدل حرارتی

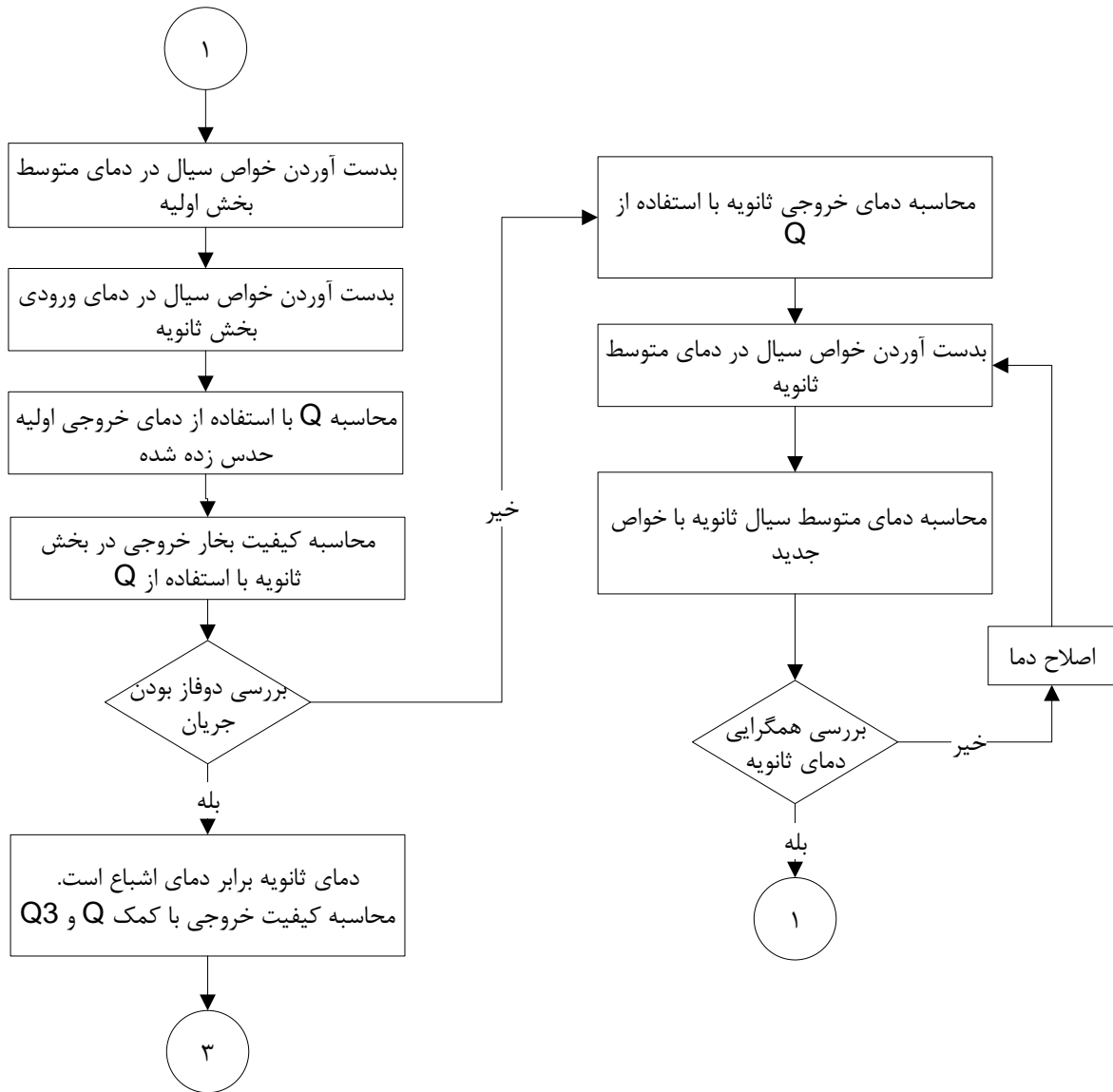
روندنمای کلی اجرای برنامه محاسبات انتقال حرارت سیال در مبدل حرارتی با جریان تکفاز اولیه و جریان دوفاز همگن ثانویه در شکل ۲۸، شکل ۲۹، شکل ۳۰ و شکل ۳۱ نشان داده شده است. بر اساس شکل ۲۹ پس از پردازش اولیه داده‌های ورودی و مشخص شدن ابعاد مسئله و نوع حجم‌بندی اولیه و ثانویه، Q_1 و Q_2 و Q_3 که به ترتیب میزان 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 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 ۳۰) 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 ۳۱) 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.



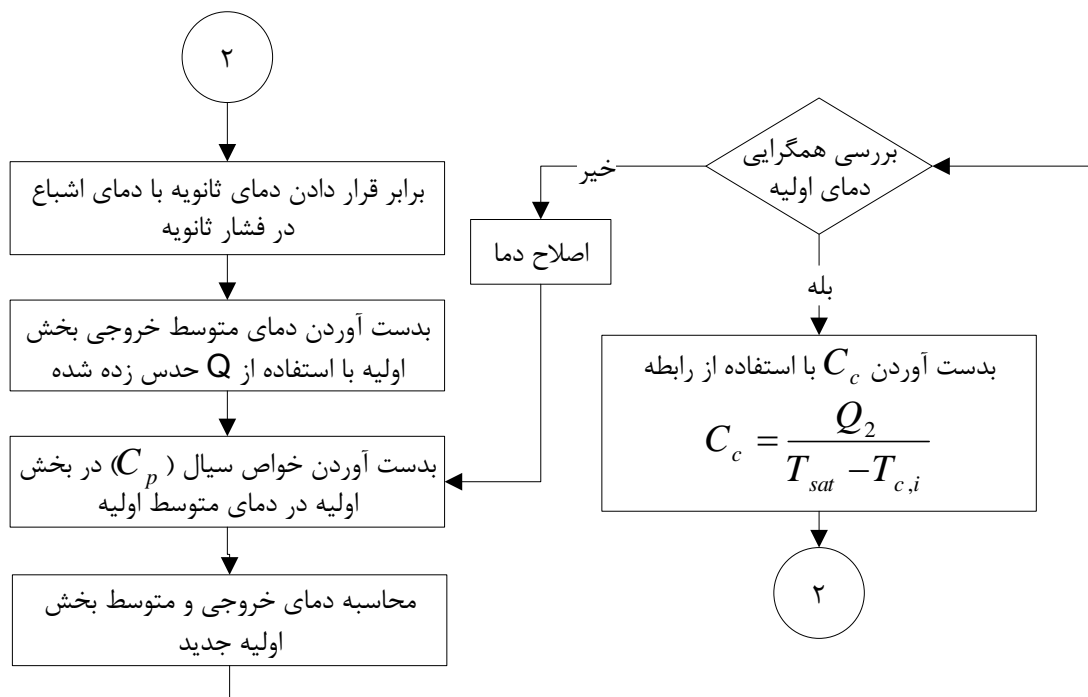
شکل ۲۸: روندنمای کلی حل مدل مولد بخار



شکل ۲۹: روندنمای فرآیند مدل‌سازی مبدل حرارتی پوسته و لوله



شکل ۳۰: روندنمای فرآیند مدل‌سازی مبدل حرارتی پوسته و لوله بخش ۱



شکل ۳۱: روندنمای فرآیند مدل‌سازی مبدل حرارتی پوسته و لوله بخش ۲

۱۳- قابلیت‌های کد

کد LOOP2.0 قادر است مدارهای نیروگاهی شامل قلب راکتور، پمپ‌های گردش جریان، خطوط لوله و مولد بخار را در حالت گذرا 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. امکانات در نظر گرفته شده برای کاربر عبارتند از:

- انتخاب تعداد دلخواه گره شعاعی در سوخت، غلاف سوخت و فاصله گازی برای به دست آوردن توزیع دما
- امکان انتخاب تولید حرارت در غلاف سوخت و فاصله گازی 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 و یا تعریف جدول تغییرات دمایی ضریب رسانش حرارتی 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 انتخاب زاویه کانال، انشعاب یا تک‌حجم 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 توسط کاربر
- امکان مدل‌سازی انشعاب با حداکثر ۲۰۰ اتصال
- 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 افقی 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
- امکان تعیین شرایط ورودی مسأله بصورت دو فاز (با کیفیت بزرگ‌تر از صفر)
- امکان مدل‌سازی حالت‌های گذرای توان، دبی، دما، فشار و کیفیت و همچنین لحاظ قابلیت مدل‌سازی توقف پمپ

۱۴- راستی‌آزمایی برنامه کامپیوتری

برای راستی‌آزمایی عملکرد کد LOOP2.0 و مقایسه نتایج محاسبات با کدهای تجاری مسائل بی‌شماری قابل بررسی است. بدین منظور نتایج این کد و نتایج حاصل از کد RELAP5 برای دو مسأله نمونه بررسی شده است. انتخاب این دو مسأله بر اساس دو فاکتور کاربردی بودن و نشان دادن قابلیت‌های کد انجام شده است. این مسائل بر اساس مشخصات مدارهای اولیه نیروگاه بوشهر انتخاب شده‌اند. هندسه مسائل شامل راکتور، چهار مدار اولیه نیروگاه بوشهر شامل چهار مولد بخار و چهار پمپ و خطوط لوله سرد و گرم است. در مسأله اول تغییرات دلخواه زمانی توان، دبی، دما و فشار ورودی و در مسأله دوم گذره خاموش شدن یک و دو پمپ از پمپ‌های مدار اولیه بررسی می‌گردد.

۱۴-۱- مشخصات مدار و حجم بندی آن

همانطور که ذکر شد، از مشخصات راکتور و مدارهای نیروگاه بوشهر برای نشان دادن صحت عملکرد کد استفاده شده است. نیروگاه هسته‌ای بوشهر دارای قلب راکتور با ۱۶۳ مجتمع سوخت، چهار مدار اولیه که هر یک متصل به یک پمپ و یک مولد بخار است، می‌باشد. در این بخش مشخصات اجزای مسأله معرفی شده است. در شکل ۳۲ حجم بندی مربوط به مدار اول نیروگاه بوشهر نشان داده شده است. در این شکل تنها دو مدار از چهار مدار اولیه رسم شده است.

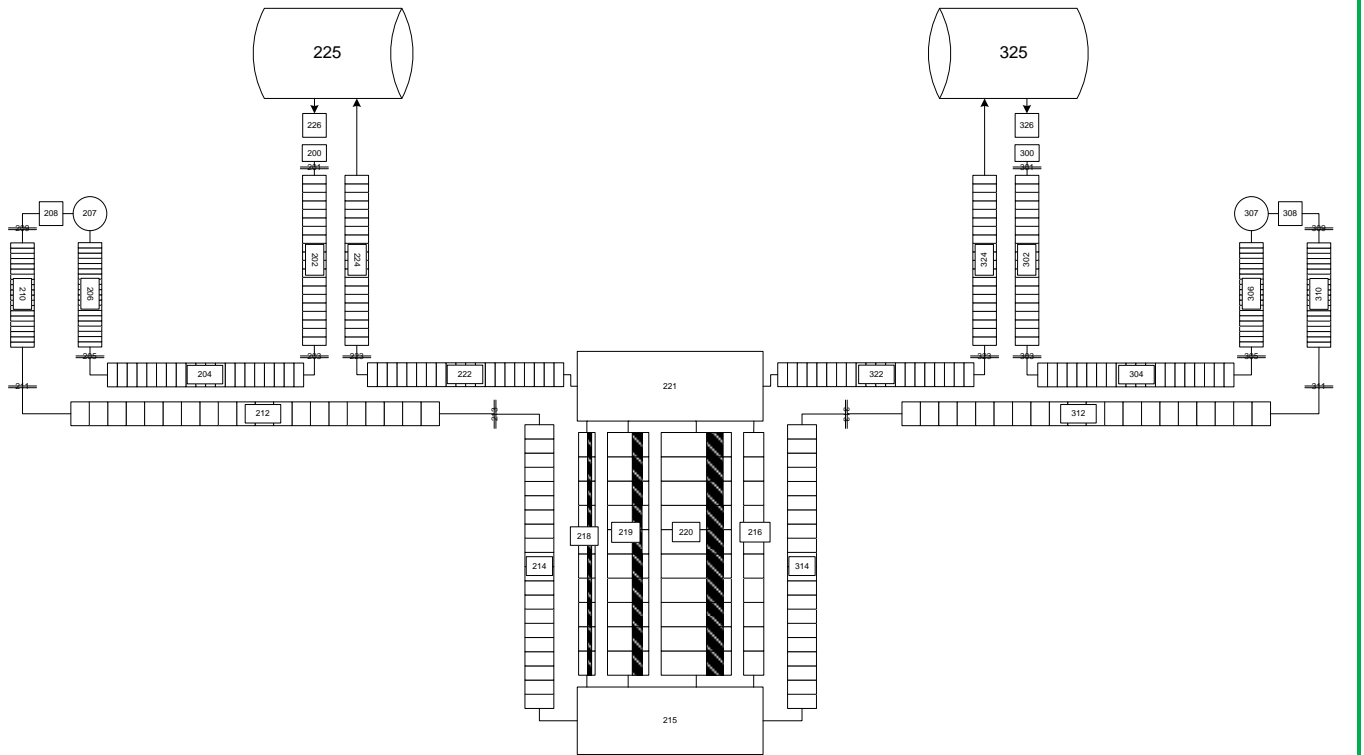
۱۴-۱-۱- مشخصات قلب راکتور

در مدل‌سازی انجام شده قلب راکتور بوشهر بصورت سه کانال اصلی به‌همراه تولید حرارت، بعنوان بخش تولید حرارت قلب، یک کانال بعنوان کانال کنارگذر قلب که سیال عبوری از آن سهمی در برداشت حرارت تولیدی در قلب ندارد و دو انشعاب بالا و پایین بعنوان بخش بالایی^۱ و بخش پایینی^۲ قلب راکتور در نظر گرفته شده است. همچنین بخش پایین‌ریز^۳ محفظه راکتور بصورت چهار کانال یا لوله قائم رو به پایین در نظر گرفته شده است که سیال را از پایه سرد وارد بخش پایین قلب می‌کند.

۱ - Upper plenum

۲ - Lower plenum

۳ - down comer



شکل ۳۲: حجم بندی اجزای مدارهای نیروگاه بوشهر

۱-۱-۱-۱۴- مشخصات کانال‌های قلب راکتور

کانال‌های قلب راکتور شامل سه کانال تولید حرارت و یک کانال کنارگذر دارای طول یکسان سطوح مقطع مختلف در نظر گرفته شده اند. مشخصات کانال‌های قلب راکتور در جدول شماره ۵ نشان داده شده است.

جدول شماره ۵: مشخصات کانال‌های قلب راکتور

شماره جزء	نوع جزء	توضیح جزء	مشخصات
۲۱۶	لوله	کانال کنارگذر	تعداد المان حجمی: ۱۰
			طول هر المان حجمی: ۰/۳۵۳ متر
			سطح مقطع: ۰/۱۶۵۶ مترمربع
			زاویه: ۹۰ درجه
۲۱۸	لوله	کانال شماره ۱ قلب	تعداد المان حجمی: ۱۰
			طول هر المان حجمی: ۰/۳۵۳ متر
			سطح مقطع: ۰/۱۵۲۴ مترمربع
			زاویه: ۹۰ درجه
			توان تولیدی در کانال: ۱۴۲/۴۵۴ مگاوات
			تعداد مجتمع سوخت: ۶

تعداد میله سوخت: ۱۸۶۶			
ضریب توزیع توان شعاعی: ۱/۲۹			
تعداد المان حجمی: ۱۰	کانال شماره ۲ قلب	لوله	۲۱۹
طول هر المان حجمی: ۰/۳۵۳ متر			
سطح مقطع: ۱/۷۰۱۸ مترمربع			
زاویه: ۹۰ درجه			
توان تولیدی در کانال: ۱۴۲۶/۵۶۵ مگاوات			
تعداد مجتمع سوخت: ۶۷			
تعداد میله سوخت: ۲۰۸۳۷			
ضریب توزیع توان شعاعی: ۱/۱۵۶۷			
تعداد المان حجمی: ۱۰			
طول هر المان حجمی: ۰/۳۵۳ متر			
تعداد المان حجمی: ۱۰	کانال شماره ۳ قلب	لوله	۲۲۰
طول هر المان حجمی: ۰/۳۵۳ متر			
سطح مقطع: ۲/۲۸۶ مترمربع			
زاویه: ۹۰ درجه			
توان تولیدی در کانال: ۱۴۳۲/۲۷۰ مگاوات			
تعداد مجتمع سوخت: ۹۰			
تعداد میله سوخت: ۲۷۹۹۰			
ضریب توزیع توان شعاعی: ۰/۸۶۵			
تعداد المان حجمی: ۱۰			
طول هر المان حجمی: ۰/۳۵۳ متر			

۱۴-۱-۱-۲- مشخصات انشعاب‌های محفظه راکتور

بخش پایین قلب راکتور شامل فضای نیمکره شکل بین محفظه تحت فشار و برل^۱ و بخش داخل برل، بخش پایه‌های مجتمع‌های سوخت توسط یک انشعاب در نظر گرفته شده‌اند. همچنین بخش بالای قلب بصورت یک انشعاب در نظر گرفته شده است. مشخصات این انشعاب‌ها در جدول شماره ۶ نشان داده شده است.

جدول شماره ۶: انشعاب‌های پایین و بالای قلب راکتور

شماره جزء	نوع جزء	توضیح جزء	مشخصات
۲۱۵	انشعاب	بخش پایین قلب	تعداد اتصالات ورودی: ۴
			تعداد اتصالات خروجی: ۴
			طول: ۱/۵ متر
			سطح مقطع اتصال ۱: ۰/۱۶۵۶
			سطح مقطع اتصال ۲: ۰/۱۵۲۴
			سطح مقطع اتصال ۳: ۱/۷۰۱۸
			سطح مقطع اتصال ۴: ۲/۲۸۶
			سطح مقطع: ۶ مترمربع
			زاویه: ۹۰ درجه
			تعداد اتصالات ورودی: ۴
۲۲۱	انشعاب	بخش بالای قلب	تعداد اتصالات خروجی: ۴
			تعداد اتصالات ورودی: ۴
			طول: ۱ متر
			سطح مقطع اتصال ۱: ۰/۱۶۵۶
			سطح مقطع اتصال ۲: ۰/۱۵۲۴
			سطح مقطع اتصال ۳: ۱/۷۰۱۸
			سطح مقطع اتصال ۴: ۲/۲۸۶
			سطح مقطع: ۶ مترمربع
			زاویه: ۹۰ درجه
			تعداد اتصالات ورودی: ۴

۱۴-۱-۳- مشخصات میله سوخت

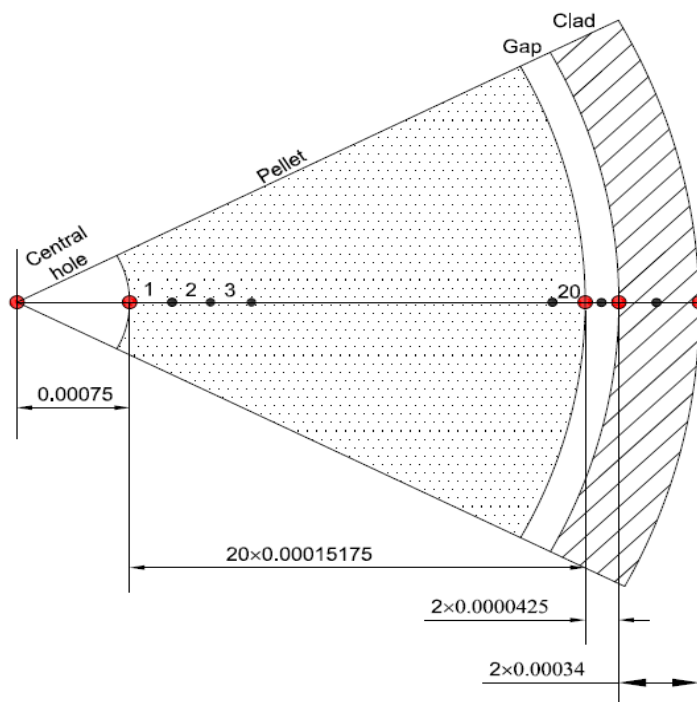
میله سوخت متشکل از سه نوع ماده سوخت اکسید اورانیوم، غلاف زیرکونیومی و فاصله‌گازی بین سوخت و غلاف است. مشخصات مورد نیاز میله سوخت نیروگاه بوشهر که در سازه‌های حرارتی کانال‌های قلب راکتور بکار می‌رود، در جدول شماره ۷ ارائه شده است. تغییرات ضریب رسانش حرارتی در نظر گرفته شده برای سوخت، گپ و غلاف بصورت تابعی از دما در جدول شماره ۹ ارائه شده است. این مقادیر بر اساس روابط ارائه شده در مرجع [۳] استخراج شده است.

تغییرات ظرفیت گرمایی ویژه حجمی در نظر گرفته شده برای سوخت، گپ و غلاف بصورت تابعی از دما در جدول شماره ۱۰ ارائه شده است. این مقادیر بر اساس روابط ارائه شده در مرجع [۳] استخراج شده است. لازم به ذکر است که ظرفیت گرمایی ویژه حجمی ($J/m^3/K$) از حاصل ضرب ظرفیت گرمایی ویژه جرمی ($J/kg/K$) در چگالی (kg/m^3) ماده به دست می‌آید.

جدول شماره ۷: مشخصات کانال استوانه‌ای و میله سوخت راکتور نیروگاه بوشهر

پارامتر	مقدار
شعاع داخلی سوخت	۰/۰۰۰۷۵ متر
شعاع خارجی سوخت	۰/۰۰۳۷۸۵ متر
شعاع داخلی غلاف سوخت	۰/۰۰۳۸۷۰ متر
شعاع خارجی غلاف سوخت	۰/۰۰۴۵۵۰ متر
طول میله سوخت	۳/۵۳ متر
تعداد بازه مکانی در سوخت	۲۰ عدد
تعداد بازه مکانی در گپ	۲ عدد
تعداد بازه مکانی در غلاف	۲ عدد
قطر هیدرولیکی معادل چهار میله سوخت	۰/۰۱۱۴ متر

در شکل ۳۳ نمایی از مقطع عرضی میله سوخت راکتور نیروگاه بوشهر به همراه گره‌ها و بازه‌های محاسباتی نشان داده شده است. جدول شماره ۸ ضرایب متوسط توزیع محوری توان در میله‌های سوخت نشان داده شده است.



شکل ۳۳: نمایی از مقطع عرضی سوخت نیروگاه بوشهر به همراه گره‌ها و بازه‌های محاسباتی

جدول شماره ۸: ضرایب توزیع محوری توان در میله‌های سوخت

شماره حجم	ضریب محوری توان
حجم ۱	۰/۲۴۵
حجم ۲	۰/۷۱۰
حجم ۳	۱/۱۰۶
حجم ۴	۱/۳۹۴
حجم ۵	۱/۵۴۵
حجم ۶	۱/۵۴۵
حجم ۷	۱/۳۴۹
حجم ۸	۱/۱۰۶
حجم ۹	۰/۷۱۰
حجم ۱۰	۰/۲۴۵

جدول شماره ۹: تغییرات ضریب رسانش حرارتی سوخت، گپ و غلاف میله سوخت بوشهر بصورت تابعی از دما

Temp. (K)	Fuel (UO ₂) Conductivity (W/m/K)	Gap Conductivity (W/m/K)	Clad Conductivity (W/m/K)
273.15	5.866543	0.140485	12.658468
353.15	5.866543	0.168527	13.425529
433.15	5.866543	0.194759	14.471338
513.15	5.757771	0.219608	15.459101
593.15	5.175252	0.243347	16.412386
673.15	4.701669	0.266169	17.354765
753.15	4.309530	0.288211	18.309813
833.15	3.979976	0.309579	19.301096
913.15	3.699651	0.330357	20.352192
993.15	3.458859	0.350610	21.486668
1073.15	3.250400	0.370390	22.728090
1153.15	3.068870	0.389750	24.100040
1233.15	2.910130	0.408710	25.626080
1313.15	2.770970	0.427330	27.329800
1393.15	2.648960	0.445610	29.234750
1473.15	2.542190	0.463590	31.364510
1553.15	2.449230	0.481290	33.742650
1633.15	2.369000	0.498730	36.392750
1713.15	2.300750	0.515920	39.338360
1793.15	2.244000	0.532870	42.603080
1873.15	2.198530	0.549610	46.210460
1953.15	2.220010	0.566140	50.184080
2033.15	2.265120	0.582470	54.547500
2113.15	2.317488	0.598622	59.324310

2193.15	2.378292	0.614591	64.538070
2273.15	2.448892	0.630392	70.212350
2353.15	2.530864	0.646031	76.370740
2433.15	2.626042	0.661516	83.036780
2513.15	2.736552	0.676853	90.234070
2593.15	2.864863	0.692048	97.986176
2673.15	3.013845	0.707108	106.31665
2753.15	3.186826	0.722036	115.24908

جدول شماره ۱۰: تغییرات ظرفیت گرمایی ویژه حجمی سوخت، گپ و غلاف میله سوخت پوشهر بصورت تابعی از دما

Fuel (UO ₂)		Gap		Clad	
Temp. (K)	Capacity (J/m ³ /K)	Temp. (K)	Capacity (J/m ³ /K)	Temp. (K)	Capacity (J/m ³ /K)
300.0	2862000.0	273.2	18176.0	300.2	1834000.0
500.0	3042200.0	300.2	13450.0	473.2	1972000.0
700.0	3201200.0	473.2	10594.0	573.2	2109000.1
900.0	3286000.0	573.2	8776.0	673.2	2246000.7
1100.0	3328400.0	673.2	7478.0	773.2	2410000.4
1300.0	3381400.0	873.2	5764.0	873.2	2606000.9
1500.0	3392000.0	1073.2	4674.0	973.2	2934000.4
1700.0	3476800.0	1700.2	4674.0	1073.2	2751000.0
1900.0	3604000.0	2700.2	4674.0	1173.2	2489000.0
2100.0	3858400.0	-	-	1273.2	1899000.5
2300.0	4134000.0	-	-	2273.2	1899000.5
2500.0	4515600.0	-	-	-	-
2700.0	4982000.0	-	-	-	-
2900.0	5512000.0	-	-	-	-
3900.0	5512000.0	-	-	-	-

۱۴-۱-۲- مشخصات خط لوله سرد و گرم

خط لوله خروجی از محفظه تحت فشار راکتور تا مولد بخار، خط لوله گرم و لوله خروجی از مولد بخار تا محفظه راکتور، خط لوله سرد نامیده می‌شود. در مدلسازی انجام شده خط لوله گرم از ۲ لوله و خط لوله سرد از ۵ لوله تشکیل شده است. مشخصات این دو خط شامل لوله‌ها و اتصالات مربوطه در جدول شماره ۱۱ ارائه شده است. در این جدول همچنین مشخصات پایین ریز محفظه راکتور که سیال سرد را از ورودی محفظه به انشعاب پایین قلب متصل می‌کند، ارائه شده است.

جدول شماره ۱۱: مشخصات خطوط لوله سرد و گرم

شماره جزء	نوع جزء	توضیح جزء	مشخصات
۲۰۲	لوله	لوله عمودی خروجی از مولد بخار (پایه سرد)	تعداد حجم: ۱۰
			طول هر حجم: ۰/۵۵ متر
			سطح مقطع: ۰/۵۶۷ مترمربع
			زاویه: ۲۷۰ درجه
۲۰۳	اتصال	(پایه سرد)	سطح مقطع: ۰/۵۶۷ مترمربع
			نوع: زانویی
			از جزء شماره ۲۰۲ به جزء شماره ۲۰۴
۲۰۴	لوله	لوله افقی بین مولد بخار و پمپ	تعداد حجم: ۱۰
			طول هر حجم: ۰/۵۸۸ متر
			سطح مقطع: ۰/۵۶۷ مترمربع
			زاویه: ۰ درجه
۲۰۵	اتصال	(پایه سرد)	سطح مقطع: ۰/۵۶۷ مترمربع
			نوع: زانویی
			از جزء شماره ۲۰۴ به جزء شماره ۲۰۶
۲۰۶	لوله	لوله عمودی ورودی به پمپ (پایه سرد)	تعداد حجم: ۱۰
			طول هر حجم: ۰/۳۲۶ متر
			سطح مقطع: ۰/۵۶۷ مترمربع
			زاویه: ۹۰ درجه
۲۰۸	تک حجم	(پایه سرد)	طول: ۰/۳ متر
			سطح مقطع: ۰/۵۶۷ مترمربع
			زاویه: ۰ درجه
۲۰۹	اتصال	(پایه سرد)	سطح مقطع: ۰/۵۶۷ مترمربع
			نوع: زانویی
			از جزء شماره ۲۰۸ به جزء شماره ۲۱۰
۲۱۰	لوله	لوله عمودی خروجی از پمپ (پایه سرد)	تعداد حجم: ۱۰
			طول هر حجم: ۰/۳۲۶ متر
			سطح مقطع: ۰/۵۶۷ مترمربع
			زاویه: ۲۷۰ درجه

سطح مقطع: ۰/۵۶۷ مترمربع	(پایه سرد)	اتصال	۲۱۱
نوع: زانویی			
از جزء شماره ۲۱۰ به جزء شماره ۲۱۲			
تعداد حجم: ۱۰	لوله افقی ورودی به محفظه راکتور (پایه سرد)	لوله	۲۱۲
طول هر حجم: ۱/۰۵ متر			
سطح مقطع: ۰/۵۶۷ مترمربع			
زاویه: ۰ درجه			
سطح مقطع: ۰/۵۶۷ مترمربع	(پایه سرد)	اتصال	۲۱۳
نوع: زانویی			
از جزء شماره ۲۱۲ به جزء شماره ۲۱۴			
تعداد حجم: ۱۰	پایین ریز درون محفظه راکتور (پایه سرد)	لوله	۲۱۴
طول هر حجم: ۰/۷ متر			
سطح مقطع: ۰/۵۶۷ مترمربع			
زاویه: ۲۷۰ درجه			
تعداد حجم: ۱۰	لوله افقی خروجی از محفظه راکتور (پایه گرم)	کانال	۲۲۲
طول هر حجم: ۰/۹۲۵ متر			
سطح مقطع: ۰/۵۶۷ مترمربع			
زاویه: ۹۰ درجه			
سطح مقطع: ۰/۵۶۷ مترمربع	(پایه گرم)	اتصال	۲۲۳
نوع: اتصال ساده			
از جزء شماره ۲۲۲ به جزء شماره ۲۲۴			
تعداد حجم: ۱۰	لوله عمودی ورودی به مولد بخار (پایه گرم)	کانال	۲۲۴
طول هر حجم: ۰/۷ متر			
سطح مقطع: ۰/۵۶۷ مترمربع			
زاویه: ۹۰ درجه			

۱۴-۱-۳- مشخصات پمپ

در هر یک از چهار مدار اولیه نیروگاه بوشهر یک پمپ برای جبران افت فشارهای مدار و گردش سیال خنک کننده وجود دارد. این پمپ‌ها از نوع گریز از مرکز تک مرحله‌ای عمودی است. روانکاری و آب خنک کننده‌ی این پمپ‌ها توسط سیستم‌های جانبی تأمین می‌گردد. در شرایط حادثه، در صورت خاموشی پمپ، تا مدت زمان کوتاهی (حدود ۱۰۰ ثانیه) پمپ بر اساس اینرسی دورانی چرخ لنگر آن به حرکت خود ادامه می‌دهد. مشخصات مورد نیاز پمپ‌های مدار اولیه در جدول شماره ۱۲ و داده‌های منحنی‌های مشخصه هد و گشتاور در جدول

شماره ۱۳ و جدول شماره ۱۴ ارائه شده است. این مشخصات به همراه داده‌های مربوط به شرایط دوفاز پمپ که بصورت پیش‌فرض در کد لحاظ شده است، برای مدل‌سازی پمپ در کد LOOP2.0 استفاده شده است.

جدول شماره ۱۲: مشخصات پمپ‌های مدار اولیه نیروگاه بوشهر

شماره جزء	نوع جزء	توضیح جزء	مشخصات
۲۰۲	پمپ	پمپ مدار اولیه نیروگاه بوشهر	سطح مقطع ورودی: ۰/۵۶۷ مترمربع
			سرعت دورانی نامی: ۱۰۴/۱۹۶ رادیان بر ثانیه
			نسبت سرعت اولیه: ۱/۰۴۸
			دبی حجمی نامی: ۵/۸۸ مترمکعب بر ثانیه
			هد نامی: ۸۶ متر
			گشتاور نامی: ۴۰۸۲۰ نیوتن در متر
			ممان اینرسی: ۷۷۰۰ کیلوگرم در مترمربع

جدول شماره ۱۳: داده‌های منحنی‌های مشخصه متشابه هد پمپ نیروگاه بوشهر

زوج مرتب نسبت سرعت و هد منحنی مشخصه متشابه						
تعداد زوج مرتب در ناحیه ۱			۶			
داده‌های ناحیه ۱	(۰ و ۱/۵۷)	(۰/۲ و ۱/۵۹)	(۰/۴ و ۱/۵۷)	(۰/۶ و ۱/۴۲)	(۰/۸ و ۱/۲)	(۱ و ۱)
تعداد زوج مرتب در ناحیه ۲			۶			
داده‌های ناحیه ۲	(۰ و -۱/۳۱)	(۰/۲ و -۰/۹۴)	(۰/۴ و -۰/۵۴)	(۰/۶ و -۰/۰۷)	(۰/۸ و ۰/۴۱)	(۱ و ۱)
تعداد زوج مرتب در ناحیه ۳			۶			
داده‌های ناحیه ۳	(-۱ و ۳/۷۹)	(-۰/۸ و ۳/۱۹)	(-۰/۶ و ۲/۶۲)	(-۰/۴ و ۲/۱۴)	(-۰/۲ و ۱/۶۹)	(۰ و ۱/۵۷)
تعداد زوج مرتب در ناحیه ۴			۶			
داده‌های ناحیه ۴	(-۱ و ۳/۷۹)	(-۰/۸ و ۳/۲۳)	(-۰/۶ و ۲/۷۷)	(-۰/۴ و ۲/۳۲)	(-۰/۲ و ۱/۹۵)	(۰ و ۱/۶۳)
تعداد زوج مرتب در ناحیه ۵			۶			
داده‌های ناحیه ۵	(۰ و ۰/۲۴)	(۰/۲ و ۰/۲۸)	(۰/۴ و ۰/۴۱)	(۰/۶ و ۰/۶۴)	(۰/۸ و ۰/۹۷)	(۱ و ۱/۲۷)
تعداد زوج مرتب در ناحیه ۶			۶			
داده‌های ناحیه ۶	(۰ و ۱/۶۳)	(۰/۲ و ۱/۴۲)	(۰/۴ و ۱/۳۱)	(۰/۶ و ۱/۲۴)	(۰/۸ و ۱/۲۳)	(۱ و ۱/۲۷)
تعداد زوج مرتب در ناحیه ۷			۶			
داده‌های ناحیه ۷	(-۱ و -۲/۶۲)	(-۰/۸ و -۱/۶۷)	(-۰/۶ و -۰/۹)	(-۰/۴ و -۰/۱۹)	(-۰/۲ و -۰/۹۴)	(۰ و ۰/۲۴)
تعداد زوج مرتب در ناحیه ۸			۶			
داده‌های ناحیه ۸	(-۱ و -۲/۶۲)	(-۰/۸ و -۲/۶۶)	(-۰/۶ و -۲/۴۷)	(-۰/۴ و -۲/۱)	(-۰/۲ و -۱/۶۹)	(۰ و -۱/۳۱)

جدول شماره ۱۴: داده‌های منحنی‌های مشخصه متشابه گشتاور پمپ نیروگاه بوشهر

زوج مرتب نسبت سرعت و گشتاور منحنی مشخصه متشابه						
۶				تعداد زوج مرتب در ناحیه ۱		
(۰/۹۹ و ۱)	(۰/۹۹ و ۰/۸)	(۱/۰۴ و ۰/۶)	(۱/۰۴ و ۰/۴)	(۱/۰۱ و ۰/۲)	(۰ و ۰/۹۹)	داده‌های ناحیه ۱
۶				تعداد زوج مرتب در ناحیه ۲		
(۰/۹۹ و ۱)	(۰/۵۹ و ۰/۸)	(۰/۲۱ و ۰/۶)	(۰/۴ و -۰/۲۴)	(۰/۲ و -۰/۶۸)	(۰ و -۱/۲۲)	داده‌های ناحیه ۲
۶				تعداد زوج مرتب در ناحیه ۳		
(۰/۹۹ و ۰)	(۱/۱۸ و -۰/۲)	(۱/۶ و -۰/۴)	(۲/۱۲ و -۰/۶)	(۲/۷۸ و -۰/۸)	(-۱ و ۳/۶۵)	داده‌های ناحیه ۳
۶				تعداد زوج مرتب در ناحیه ۴		
(۲ و ۰)	(۲/۴ و -۰/۲)	(۲/۷۵ و -۰/۴)	(۳/۱ و -۰/۶)	(۳/۴۱ و -۰/۸)	(-۱ و ۳/۶۵)	داده‌های ناحیه ۴
۶				تعداد زوج مرتب در ناحیه ۵		
(۰/۷۱ و ۱)	(۰/۳۳ و ۰/۸)	(۰/۰۵ و ۰/۶)	(۰/۴ و -۰/۲۴)	(۰/۲ و -۰/۴۹)	(۰ و -۰/۷۵)	داده‌های ناحیه ۵
۶				تعداد زوج مرتب در ناحیه ۶		
(۰/۷۱ و ۱)	(۰/۹۴ و ۰/۸)	(۱/۱۸ و ۰/۶)	(۱/۴۴ و ۰/۴)	(۱/۶۹ و ۰/۲)	(۰ و ۲)	داده‌های ناحیه ۶
۶				تعداد زوج مرتب در ناحیه ۷		
(-۰/۷۵ و ۰)	(-۱/۲ و -۰/۲)	(-۱/۷۹ و -۰/۴)	(-۲/۴۲ و -۰/۶)	(-۳/۳۹ و -۰/۸)	(-۱ و -۴/۶۱)	داده‌های ناحیه ۷
۶				تعداد زوج مرتب در ناحیه ۸		
(-۱/۲۲ و ۰)	(-۱/۷۹ و -۰/۲)	(-۲/۳۵ و -۰/۴)	(-۲/۸۷ و -۰/۶)	(-۳/۶۲ و -۰/۸)	(-۱ و -۴/۶۱)	داده‌های ناحیه ۸

۱۴-۱-۴- مشخصات مولد بخار

مولد بخار یک مبدل حرارتی از نوع پوسته - لوله است که وظیفه آن برداشت حرارت از مدار اولیه و تولید بخار خشک اشباع است. نیروگاه بوشهر چهار مولد بخار افقی مدل PGV-1000M دارد. مولد بخار دارای دو ورودی و دو خروجی است. در این مدل امکان اتصال اجزا به بخش ثانویه وجود ندارد و این امکان تنها برای بخش اولیه لحاظ شده است. در بخش ثانویه شرایط آب تغذیه ورودی به مولد بخار توسط کاربر تعیین می‌شود و در بخش اولیه شرایط ورودی به مولد بخار از مقادیر حاصل از جزء قبلی بدست می‌آید. البته در نسخه‌های آتی کد که مدار ثانویه تکمیل می‌شود، امکان اتصال اجزایی مانند خط بخار و توربین به بخش ثانویه افزوده خواهد شد. مشخصات مولد بخار نیروگاه بوشهر که در مدلسازی در کد LOOP2.0 مورد نیاز است، در جدول شماره ۱۵ ارائه شده است.

جدول شماره ۱۵: مشخصات مولد بخار نیروگاه بوشهر

شماره جزء	نوع جزء	توضیح جزء	مشخصات
۲۲۵	مولد بخار	تنها برای ورودی کد LOOP2.0 نیاز است. در ورودی کد RELAP5 یک مولد بخار با اجزای کانال و انشعاب تهیه شده است.	تعداد لوله‌های بخش اولیه: ۱۱۰۰۰
			گام افقی لوله‌ها: ۰/۰۲۳ متر
			گام عمودی لوله‌ها: ۰/۰۱۹ متر
			شعاع داخلی لوله‌ها: ۰/۰۰۶۵ متر
			ضخامت لوله‌ها: ۰/۰۰۱۵ متر
			طول متوسط دسته لوله‌ها: ۱۱/۱ متر
			تعداد ردیف‌های لوله‌ها: ۱۱۰
			ارتفاع اولین ردیف از کف مولد بخار: ۱۱۹ میلیمتر
			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 وات بر متر بر کلوین			

۱۴-۲- مسائل بررسی شده

۱۴-۲-۱- مسأله اول: تغییرات دلخواه زمانی توان، دبی، دما و فشار ورودی

در مسأله اول بررسی تغییرات دلخواه زمانی توان، دبی، دما و فشار ورودی به منظور نشان دادن قابلیت حالت‌های گذرای پارامترهای ورودی، در نظر گرفته شده است. در این مسأله تأثیر تغییرات ناشی از تغییرات همزمان توان تولیدی در کانال‌های قلب راکتور، تغییرات دبی، دما و فشار ورودی سیال به مدار بر توزیع پارامترهای ترموهیدرولیکی بررسی شده است. تغییرات پارامترهای ورودی بصورت مقادیر ارائه شده در جدول شماره ۱۶، جدول شماره ۱۷ و جدول شماره ۱۸ به برنامه داده شده است. تغییرات در نظر گرفته شده بصورت دلخواه است و لذا کاربر می‌تواند هر تغییری را که در نظر دارد به کد بدهد. در این تغییرات، هم روند افزایشی و کاهشی و هم تغییرات با روند خطی و غیر خطی استفاده شده است. به منظور نشان دادن همه این تغییرات در یک شکل، نمودار تغییرات پارامترهای توان، دبی، دما و فشار بصورت نرمال شده در بازه بین مقادیر بیشینه و کمینه آن پارامتر در طول زمان بین صفر و یک، در شکل ۳۴ نشان داده شده است.

جدول شماره ۱۶: تغییرات دما و فشار ورودی با زمان

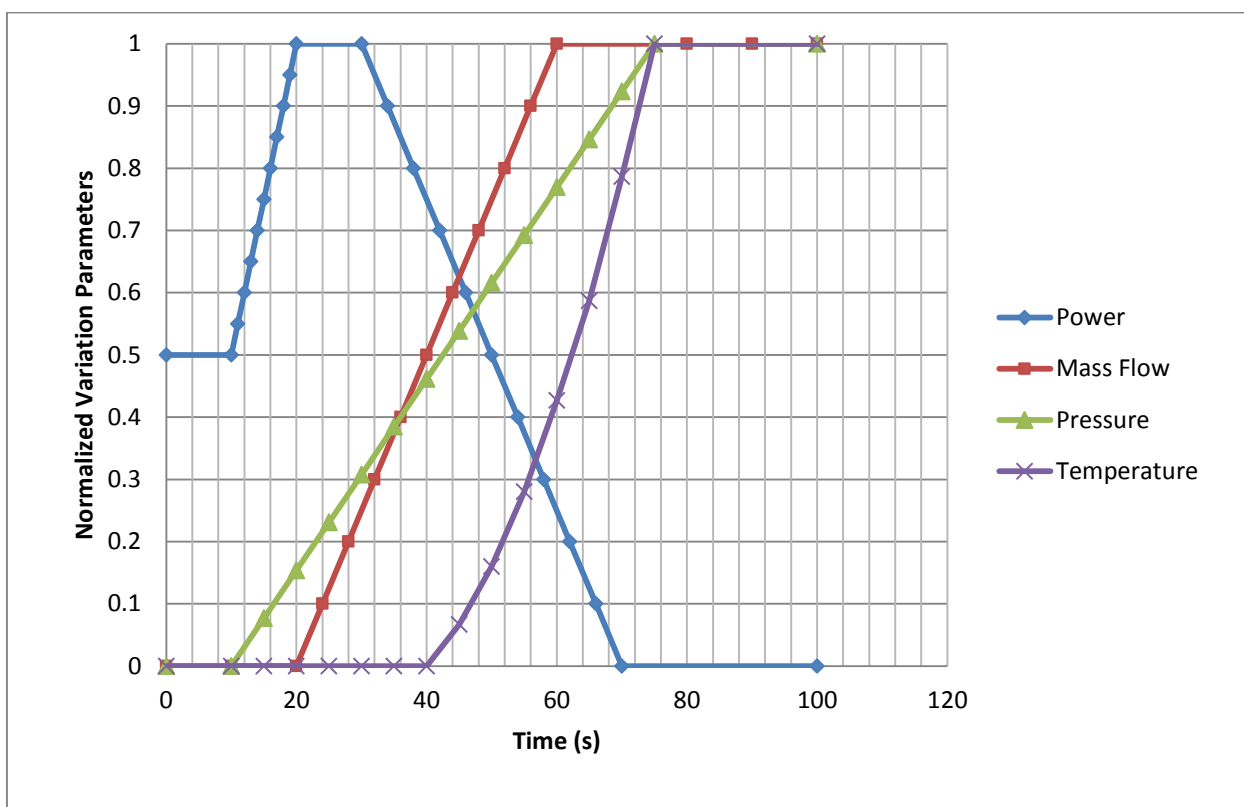
Time (s)	Pressure (kPa)	Temp. (oC)
0	15470	291.0
10	15470	291.0
15	15500	291.0
20	15530	291.0
25	15560	291.0
30	15590	291.0
35	15620	291.0
40	15650	291.0
45	15680	291.5
50	15710	292.2
55	15740	293.1
60	15770	294.2
65	15800	295.4
70	15830	296.9
75	15860	298.5
100	15860	298.5

جدول شماره ۱۷: تغییرات دبی ورودی در هر مدار با زمان

Time (s)	mass flow (kg/s)
0	4250
10	4250
20	4250
24	4255
28	4260
32	4265
36	4270
40	4275
44	4280
48	4285
52	4290
56	4295
60	4300
80	4300
90	4300
100	4300

جدول شماره ۱۸: تغییرات توان تولیدی در کانال‌های قلب راکتور با زمان

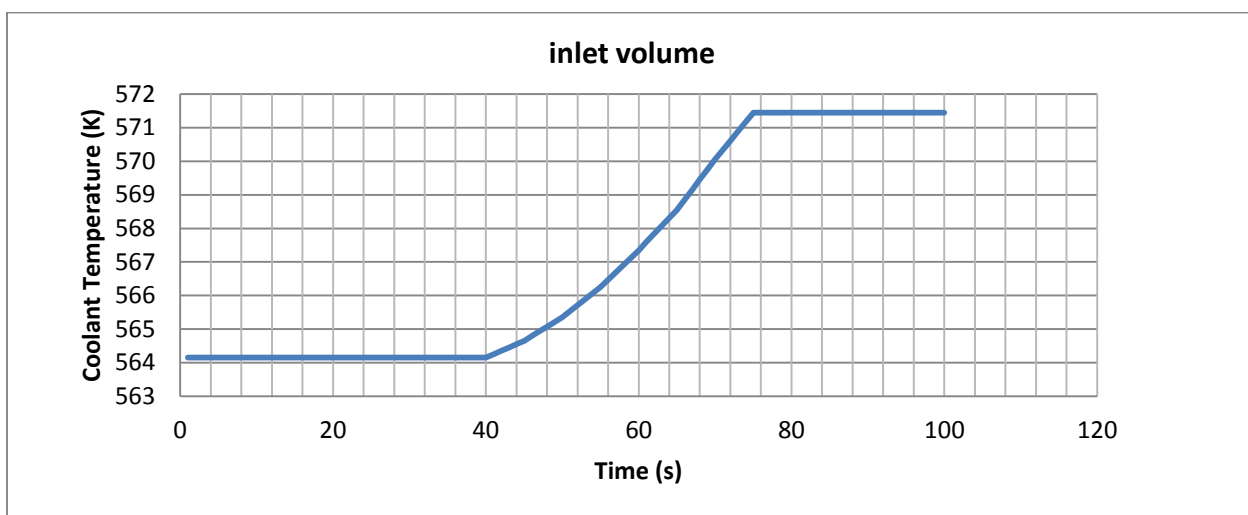
Time	power		
	channel 218	channel 219	channel 220
(s)	(W)	(W)	(W)
0	142453985.6	1426564800.6	1432270469.5
10	142453985.6	1426564800.6	1432270469.5
11	144828219.0	1450340883.6	1456141647.0
12	147202452.3	1474116966.6	1480012824.5
13	149576685.7	1497893049.5	1503884001.9
14	151950919.1	1521669132.5	1527755179.4
15	154325152.5	1545445215.5	1551626356.9
16	156699385.9	1569221298.5	1575497534.4
17	159073619.3	1592997381.5	1599368711.8
18	161447852.7	1616773464.5	1623239889.3
19	163822086.1	1640549547.4	1647111066.8
20	166196319.5	1664325630.4	1670982244.3
30	166196319.5	1664325630.4	1670982244.3
34	161447852.7	1616773464.5	1623239889.3
38	156699385.9	1569221298.5	1575497534.4
42	151950919.1	1521669132.5	1527755179.4
46	147202452.3	1474116966.6	1480012824.5
50	142453985.6	1426564800.6	1432270469.5
54	137705518.8	1379012634.6	1384528114.6
58	132957052.0	1331460468.7	1336785759.6
62	128208585.2	1283908302.7	1289043404.7
66	123460118.4	1236356136.7	1241301049.7
70	118711651.7	1188803970.8	1193558694.8
100	118711651.7	1188803970.8	1193558694.8



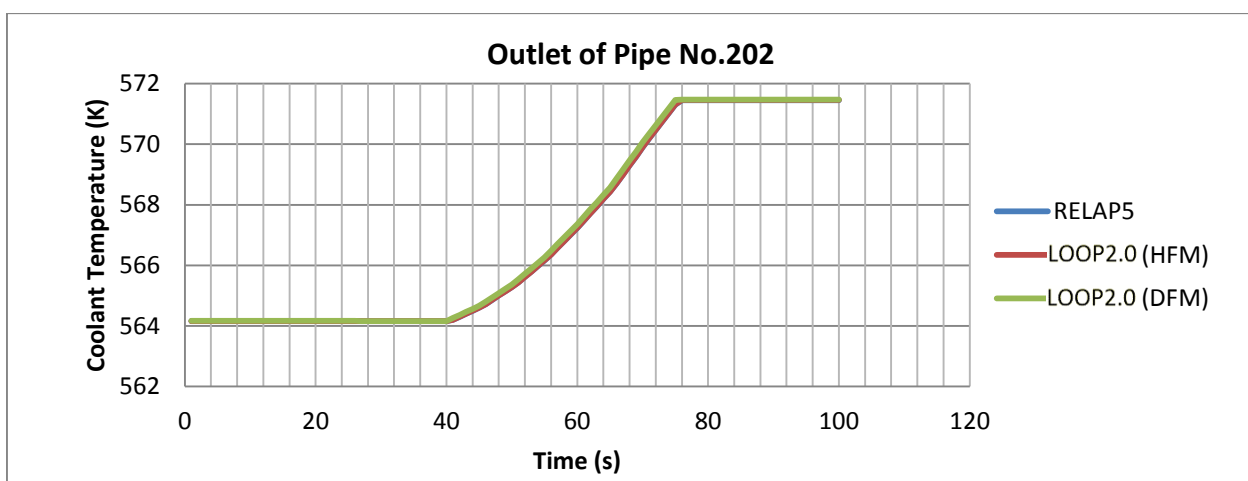
شکل ۳۴: تغییرات توان، دبی جرمی، فشار و دمای ورودی بصورت نرمال شده و تابعی از زمان

۱۴-۲-۲- بررسی نتایج مسأله ۱

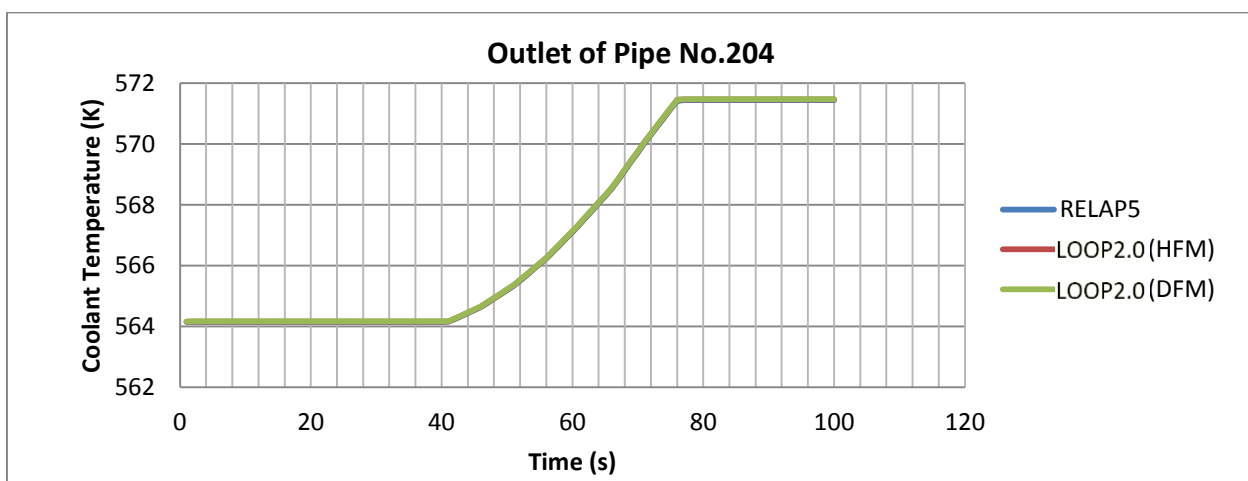
در این بخش نتایج حاصل از محاسبات انجام شده توسط کد LOOP2.0 و کد RELAP5 برای پارامترهای دما، سرعت و فشار در موقعیت های مختلف مدار بررسی شده است. در شکل ۳۵ تغییرات دمای حجم آغازین بعنوان شرایط ورودی مسأله نشان داده شده است. در شکل ۳۶ تا شکل ۴۴ تغییرات دمای سیال در اجزای پیش از قلب راکتور نشان داده شده است. در شکل ۴۵ تا شکل ۴۷ لختی انتقال تغییرات در دمای سیال در حجم‌های پیش از قلب برای کد RELAP5 و مدل همگن و شار رانشی کد LOOP2.0 نشان داده شده است. در شکل ۴۸ تا شکل ۵۵ تغییرات دمای سیال در اجزای قلب راکتور و پس از آن تا مولد بخار نشان داده شده است. در شکل ۵۶ و شکل ۵۷ تغییرات دمای مرکز سوخت و سطح غلاف در مرکز کانال‌های قلب راکتور (حجم محوری شماره ۵) نشان داده شده است. همانطور که در جدول شماره ۵ ذکر شده است شماره کانال‌های قلب به ترتیب ۲۱۸، ۲۱۹ و ۲۲۰ است. در شکل ۵۸ تا شکل ۶۶ تغییرات سرعت سیال در اجزای مختلف مدار نشان داده شده است. در شکل ۶۷ تغییرات هد یکی از پمپ‌های مدار نشان داده شده است. در شکل ۶۸ تا شکل ۷۱ تغییرات فشار سیال در موقعیت های مختلف مدار نشان داده شده است. منظور از عبارت HFM، مدل جریان دوفاز همگن و DFM مدل جریان شار رانشی است.



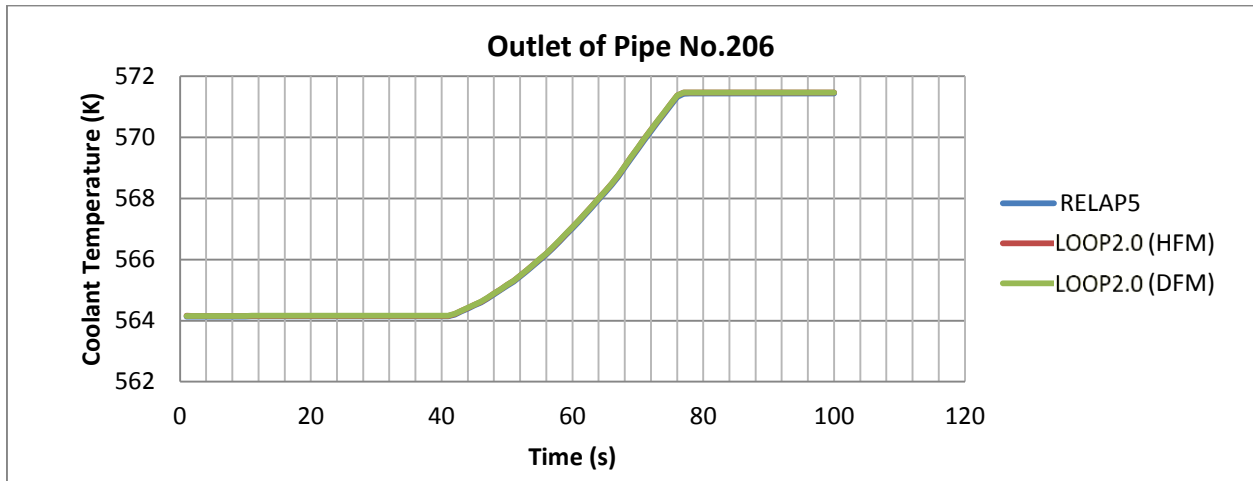
شکل ۳۵: تغییرات دمای حجم آغازین



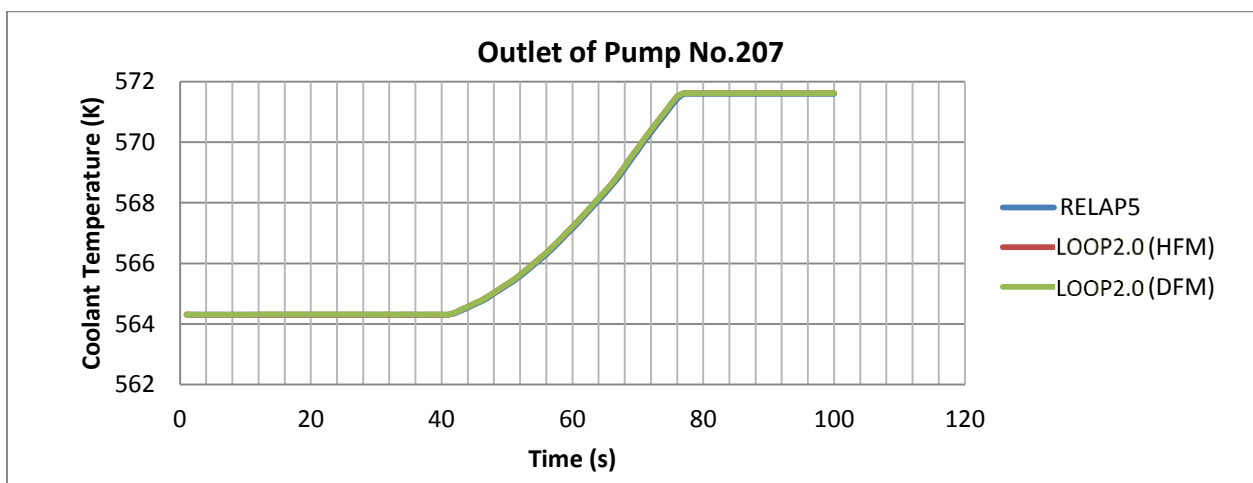
شکل ۳۶: تغییرات دمای سیال در خروجی لوله شماره ۲۰۲



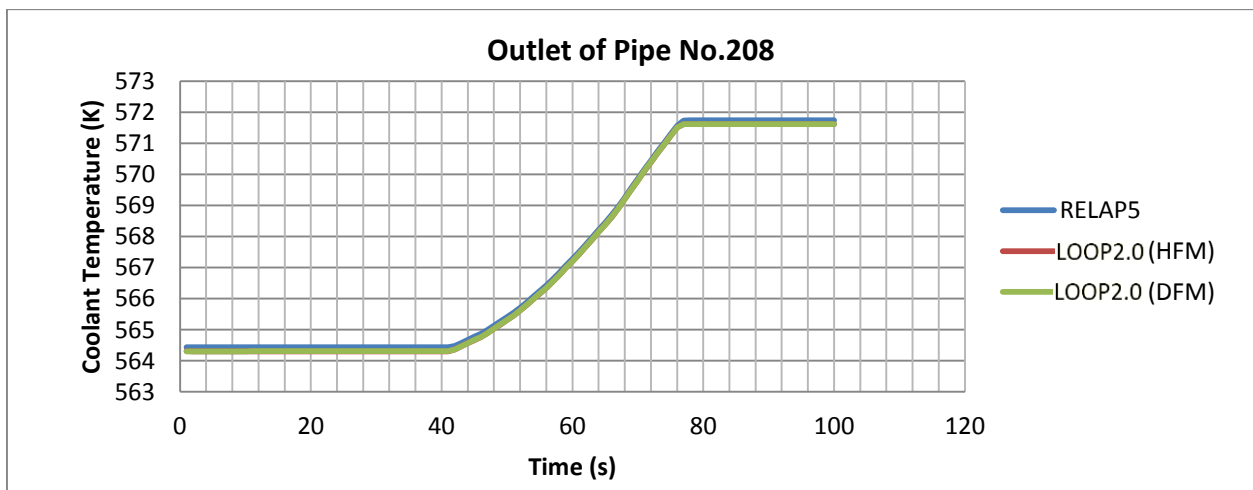
شکل ۳۷: تغییرات دمای سیال در خروجی لوله شماره ۲۰۴



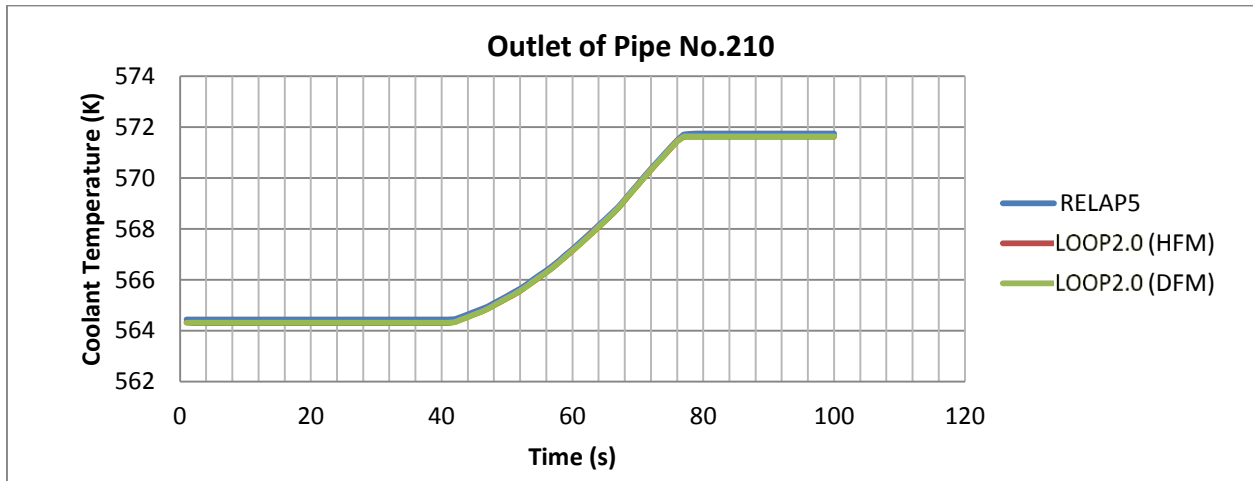
شکل ۳۸: تغییرات دمای سیال در خروجی لوله شماره ۲۰۶



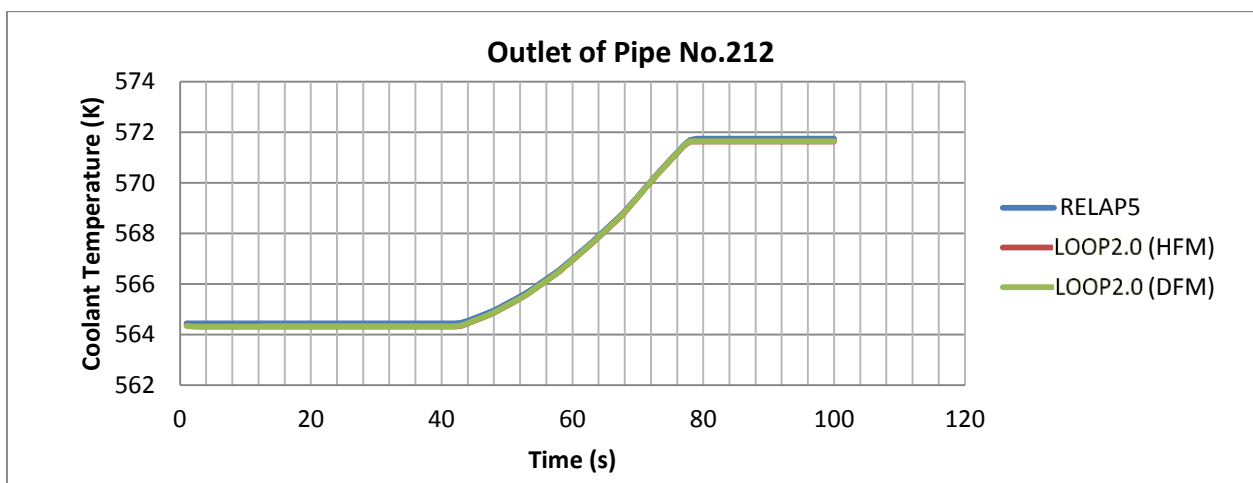
شکل ۳۹: تغییرات دمای سیال در خروجی پمپ شماره ۲۰۷



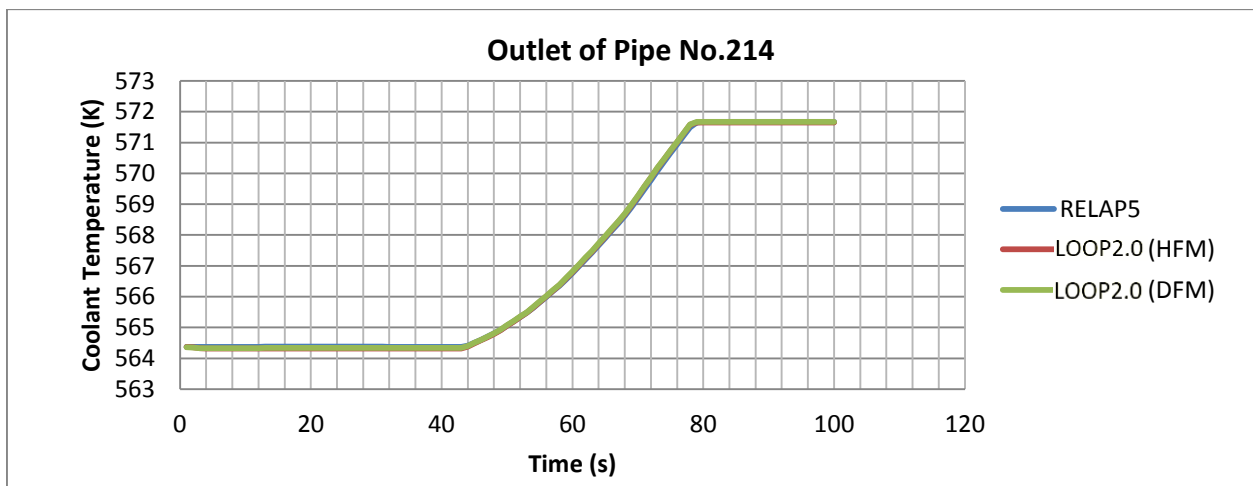
شکل ۴۰: تغییرات دمای سیال در خروجی لوله شماره ۲۰۸



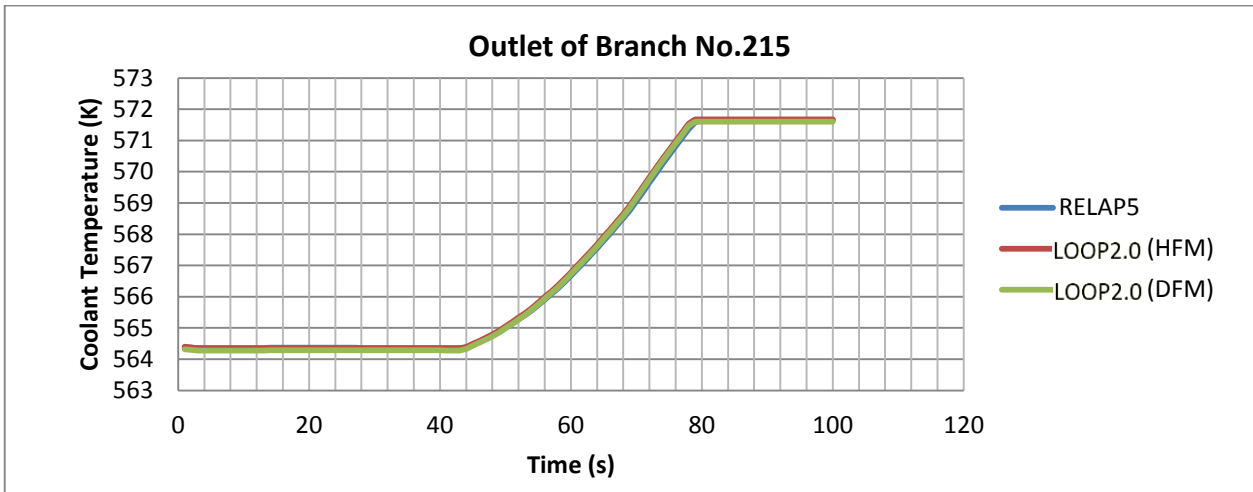
شکل ۴۱: تغییرات دمای سیال در خروجی لوله شماره ۲۱۰



شکل ۴۲: تغییرات دمای سیال در خروجی لوله شماره ۲۱۲

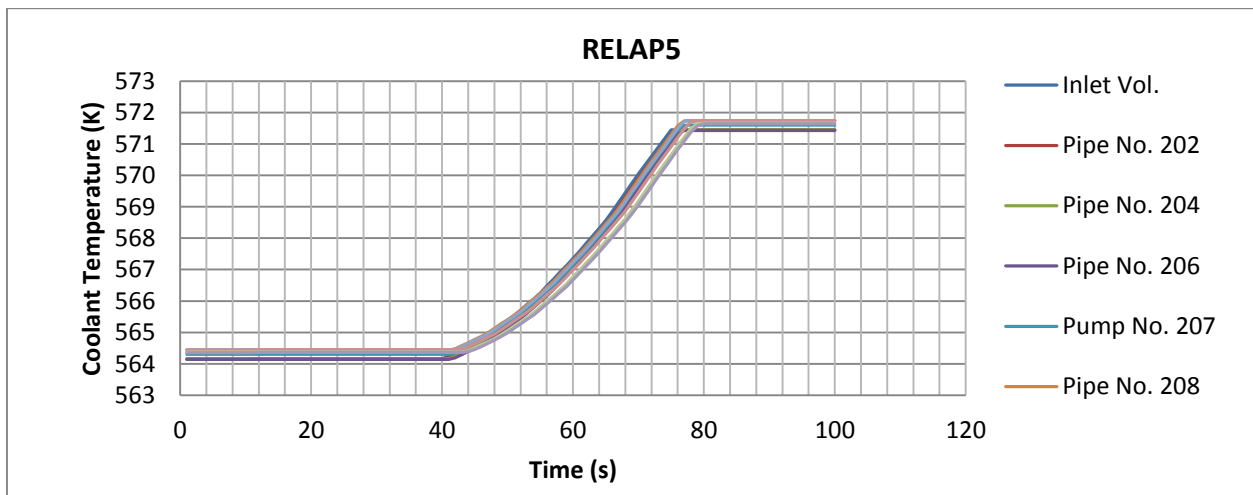


شکل ۴۳: تغییرات دمای سیال در خروجی لوله شماره ۲۱۴

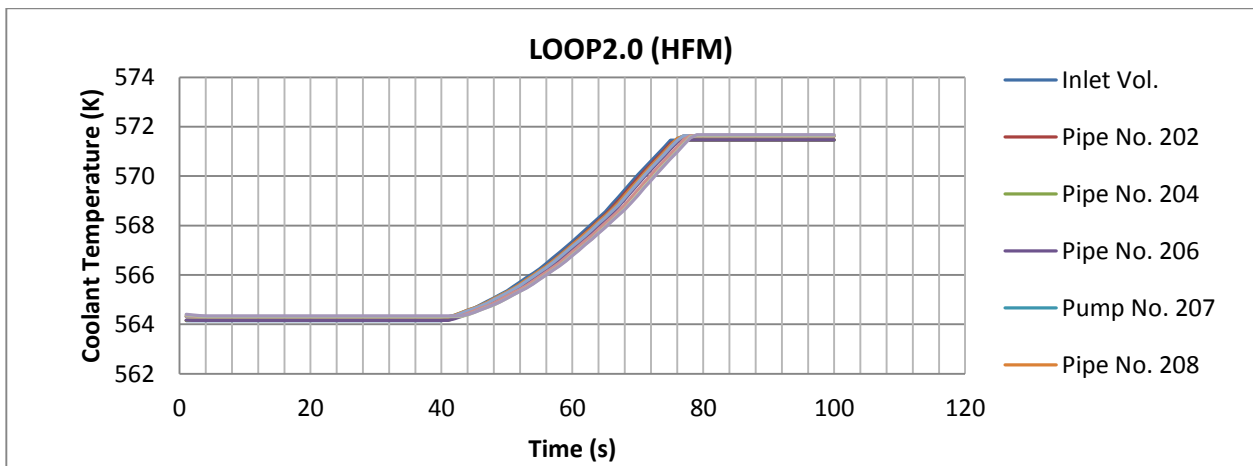


شکل ۴۴: تغییرات دمای سیال در انشعاب شماره ۲۱۵ (بخش پایین قلب راکتور)

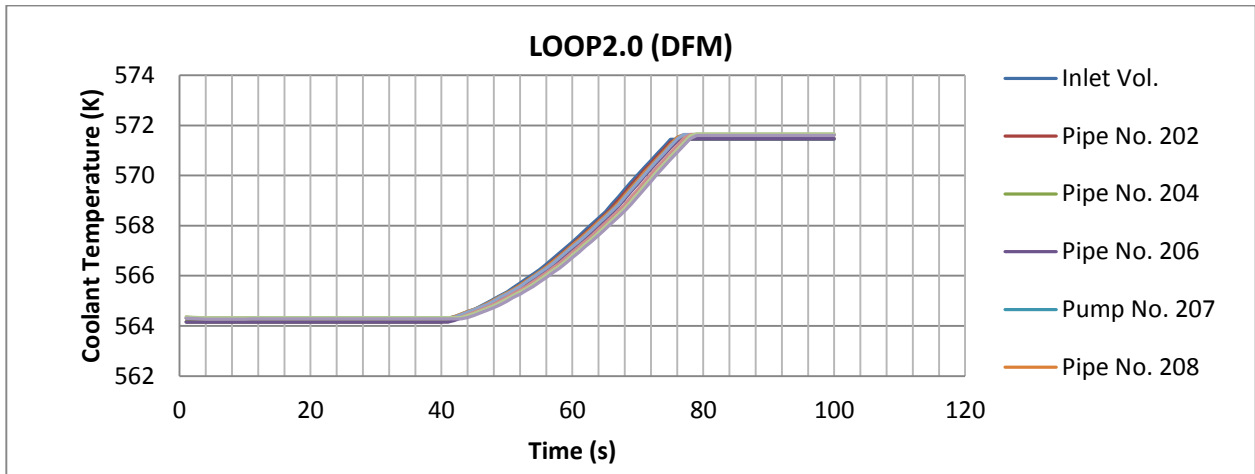
در شکل‌های فوق که توزیع دمای سیال در اجزای مختلف مدار با نتایج کد RELAP5 مقایسه شده است انطباق خوب نتایج حاصل با کد RELAP5 مشاهده می‌شود.



شکل ۴۵: لختی انتقال تغییرات در دمای سیال در اجزای پیش از قلب حاصل از کد RELAP5

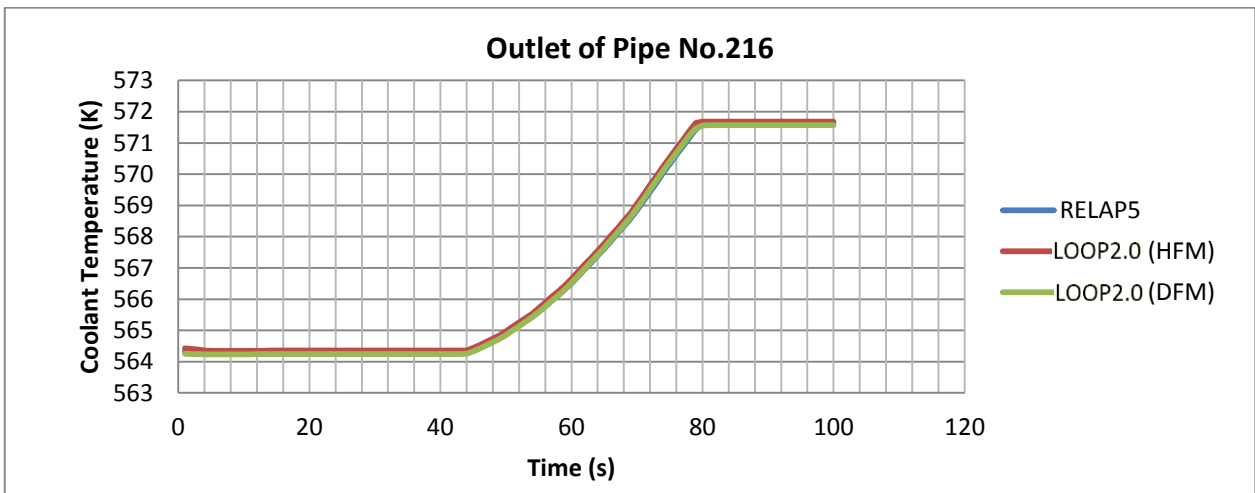


شکل ۴۶: لختی انتقال تغییرات در دمای سیال در اجزای پیش از قلب در مدل همگن کد LOOP2.0

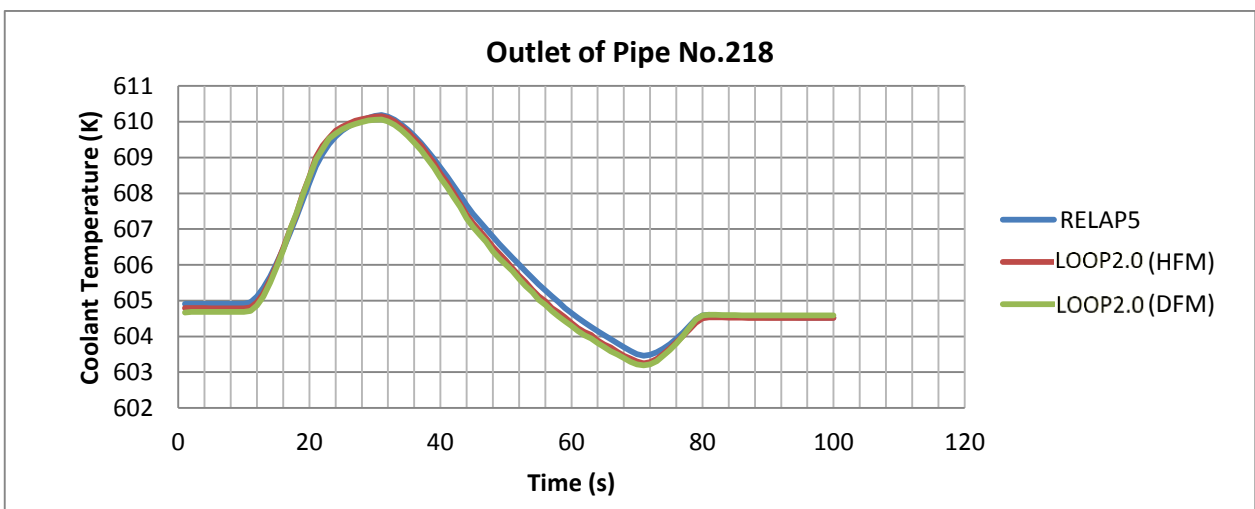


شکل ۴۷: لختی انتقال تغییرات در دمای سیال در اجزای پیش از قلب در مدل شار رانشی کد LOOP2.0

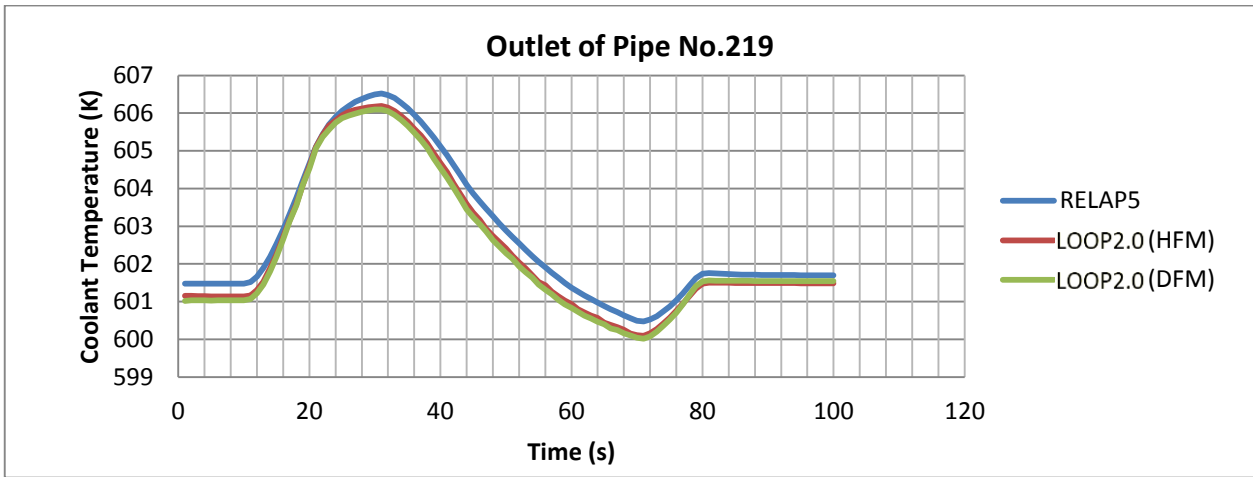
سه شکل فوق برای نشان دادن تأخیر زمانی انتقال تغییرات دمای سیال خروجی از اجزای پیش از قلب راکتور ارائه شده است.



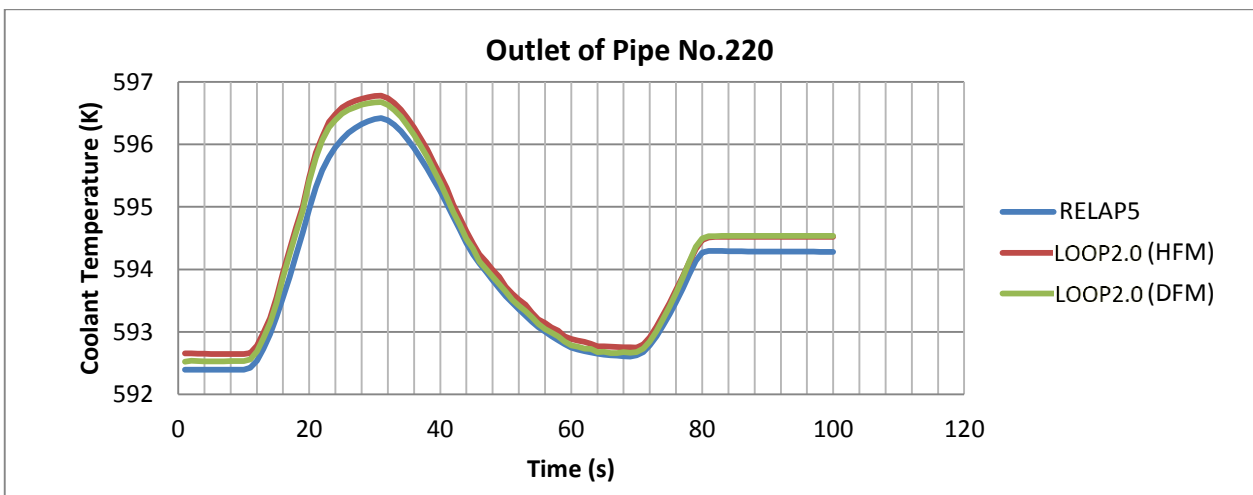
شکل ۴۸: تغییرات دمای سیال در خروجی کانال شماره ۲۱۶ (کانال کنارگذر قلب)



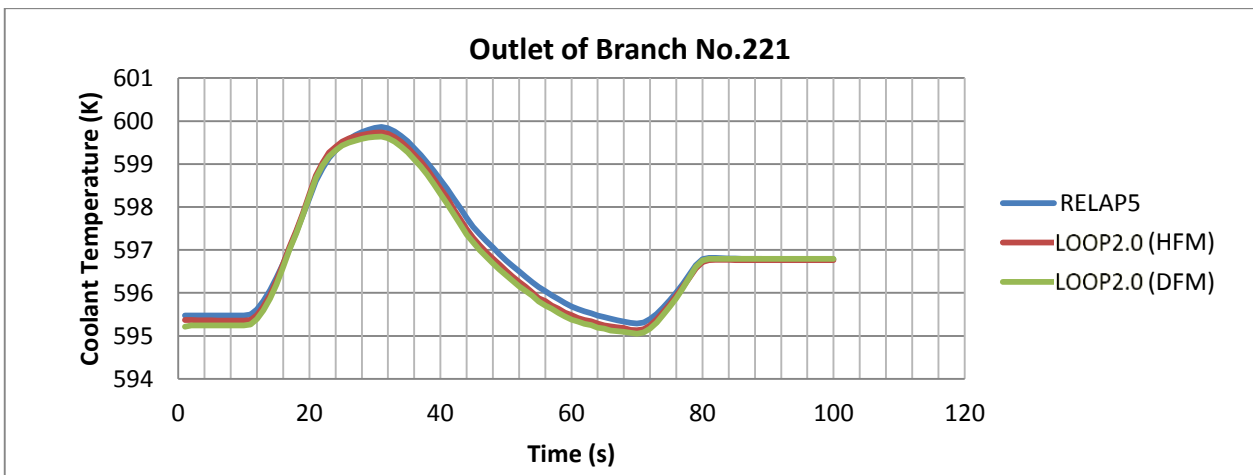
شکل ۴۹: تغییرات دمای سیال در خروجی کانال شماره ۲۱۸ (کانال داغ قلب)



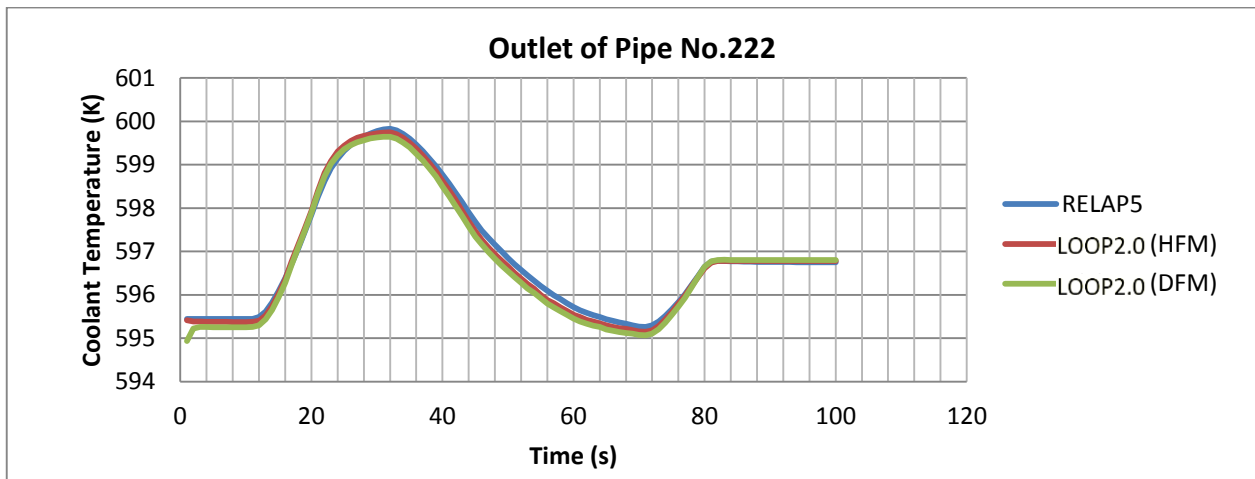
شکل ۵۰: تغییرات دمای سیال در خروجی کانال شماره ۲۱۹ (کانال متوسط قلب)



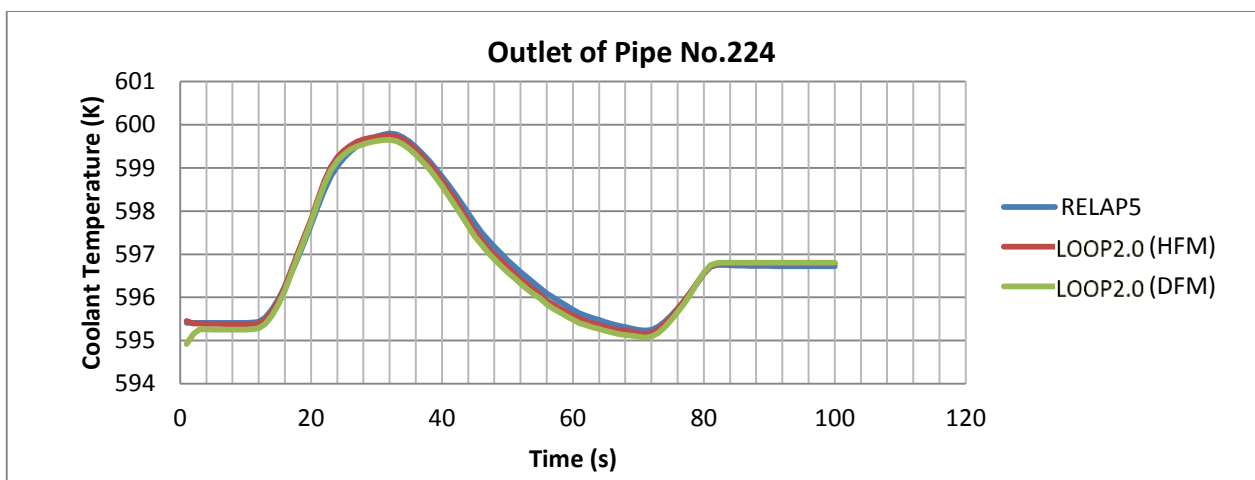
شکل ۵۱: تغییرات دمای سیال در خروجی کانال شماره ۲۲۰ (کانال متوسط قلب)



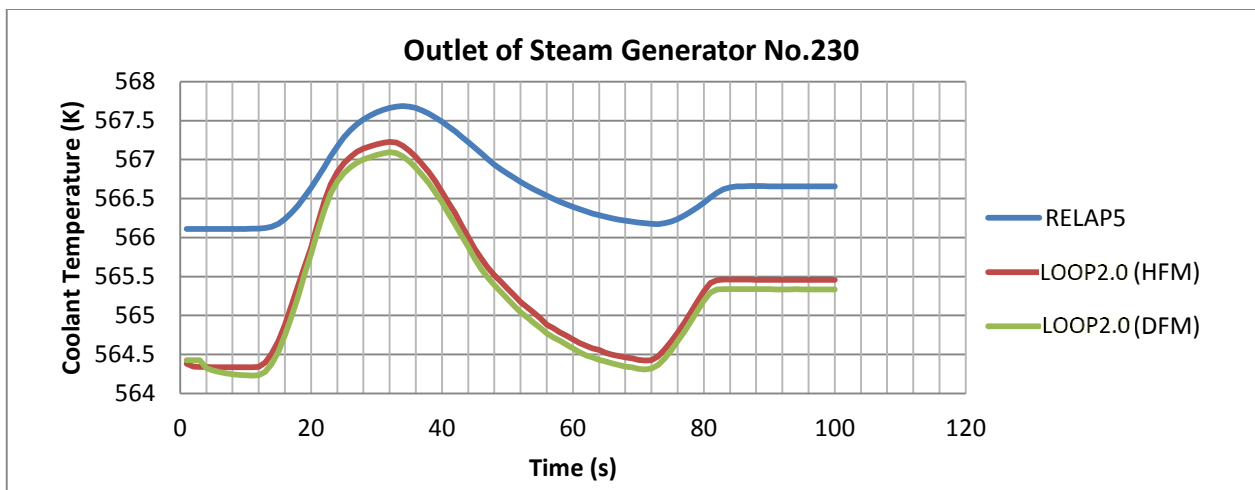
شکل ۵۲: تغییرات دمای سیال در خروجی انشعاب شماره ۲۲۱ (بخش بالای قلب راکتور)



شکل ۵۳: تغییرات دمای سیال در خروجی لوله شماره ۲۲۲ (پایه گرم خروجی از راکتور)



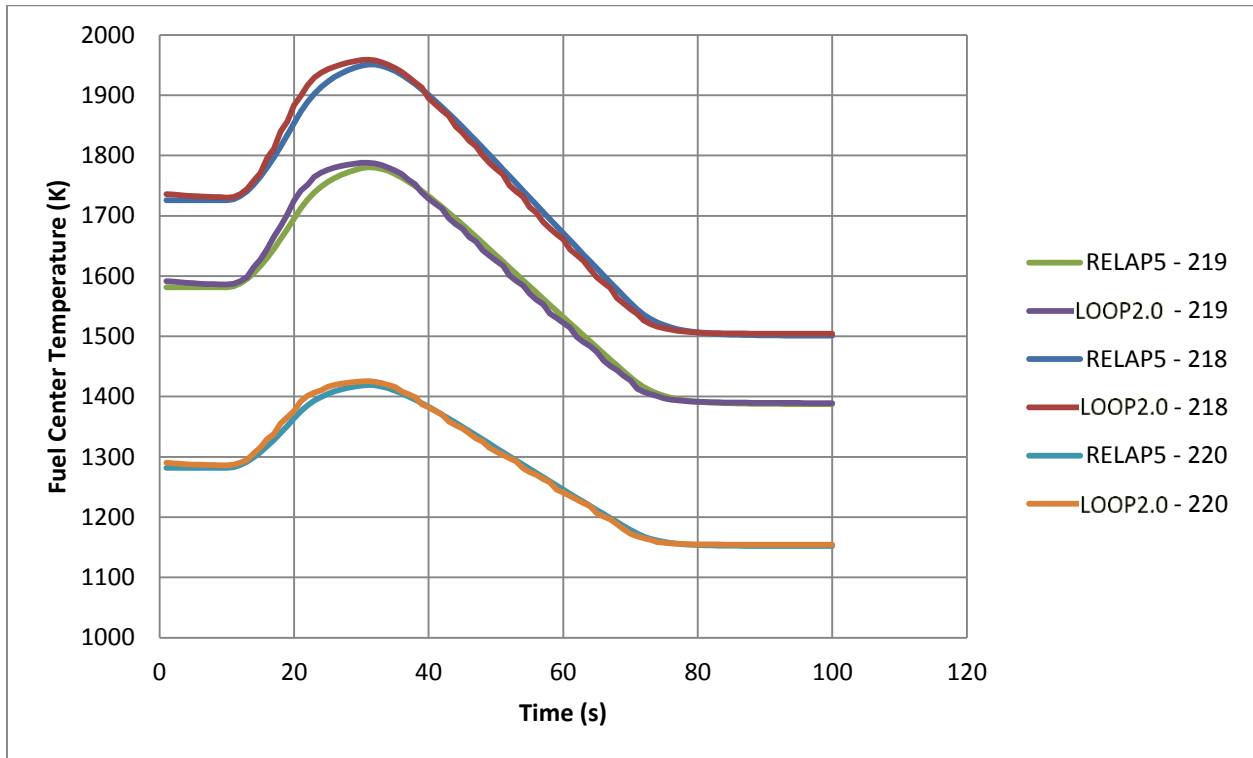
شکل ۵۴: تغییرات دمای سیال در خروجی لوله شماره ۲۲۴ (پایه گرم ورودی به مولد بخار)



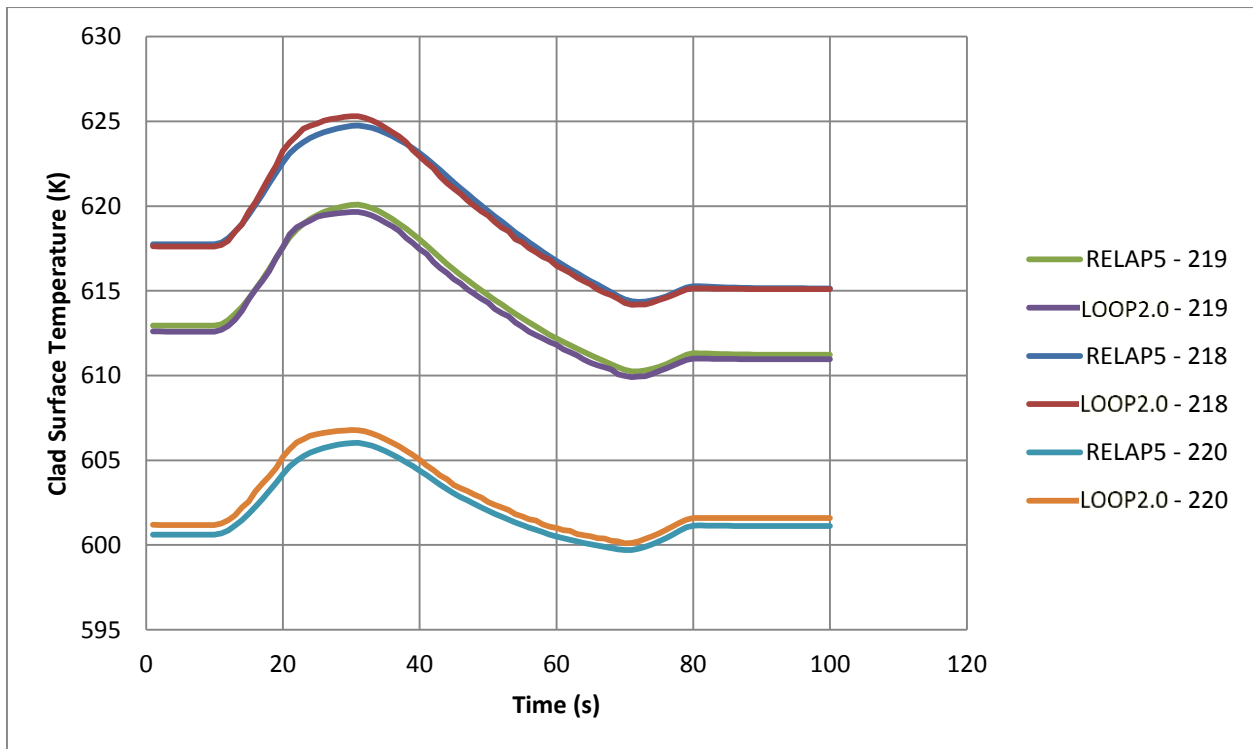
شکل ۵۵: تغییرات دمای سیال در خروجی بخش اولیه مولد بخار شماره ۲۳۰

نتایج انطباق مناسب بین نتایج کد LOOP2.0 و کد RELAP5 را نشان می‌دهد. دلیل اختلاف موجود در شکل‌های مربوط به تغییرات دمای سیال در اجزای قلب راکتور ناشی از اختلاف مدل انشعاب می‌باشد. همچنین تفاوت موجود در تغییرات دمای خروجی از مولد بخار در شکل ۵۵ ناشی از اختلاف بین مدل مولد بخار رفته در کد LOOP2.0 و کد RELAP5 است. در واقع، در کد RELAP5 مولد بخار توسط

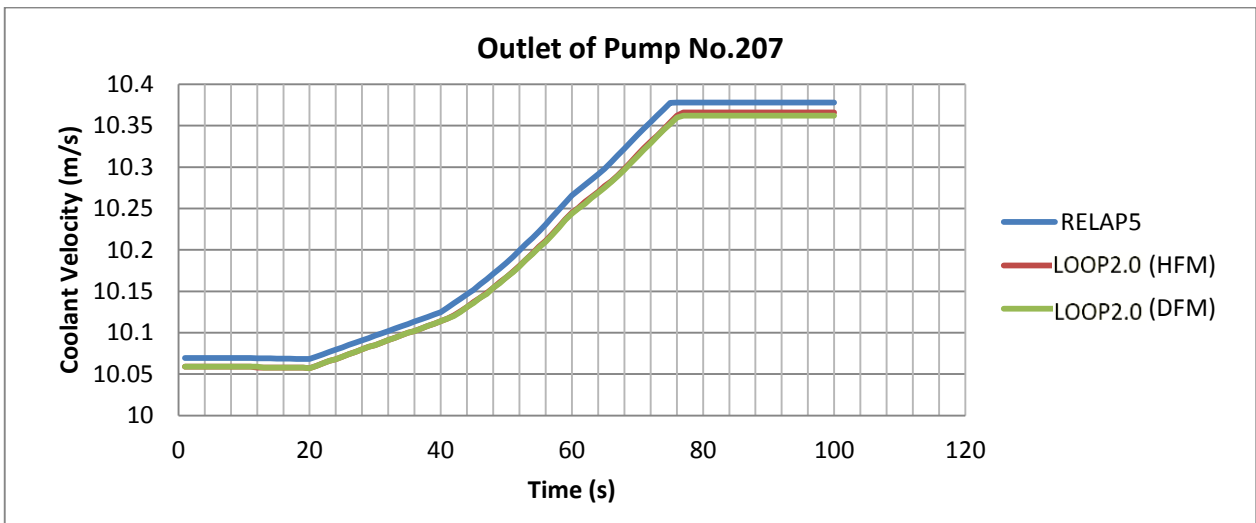
سایر اجزا مانند انشعاب، کانال و سازه‌های حرارتی مدل‌سازی می‌شود، در حالی که در کد LOOP2.0 یک مدل مجزا و ساده با فرضیات ارائه شده در بخش‌های قبل برای مدل‌سازی مولد بخار در نظر گرفته شده است.



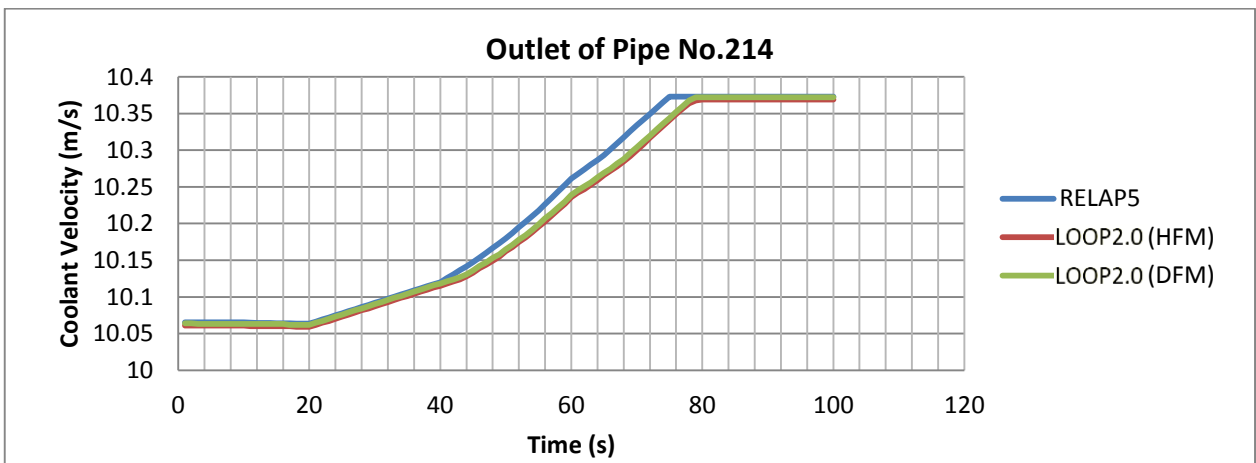
شکل ۵۶: تغییرات دمای مرکز سوخت در مرکز کانال‌های قلب راکتور (حجم محوری شماره ۵)



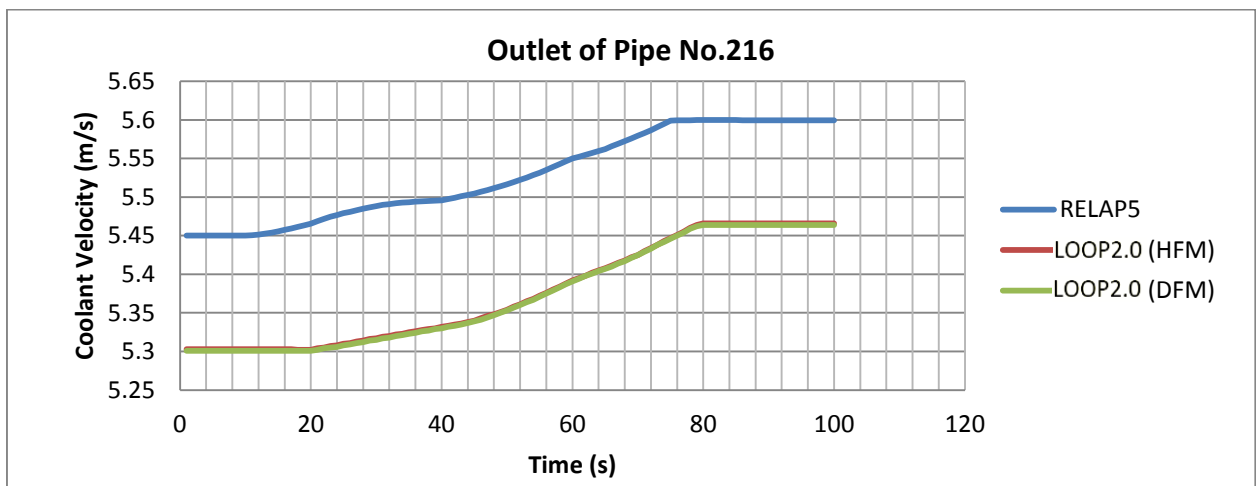
شکل ۵۷: تغییرات دمای سطح غلاف سوخت در مرکز کانال‌های قلب راکتور (حجم محوری شماره ۵)



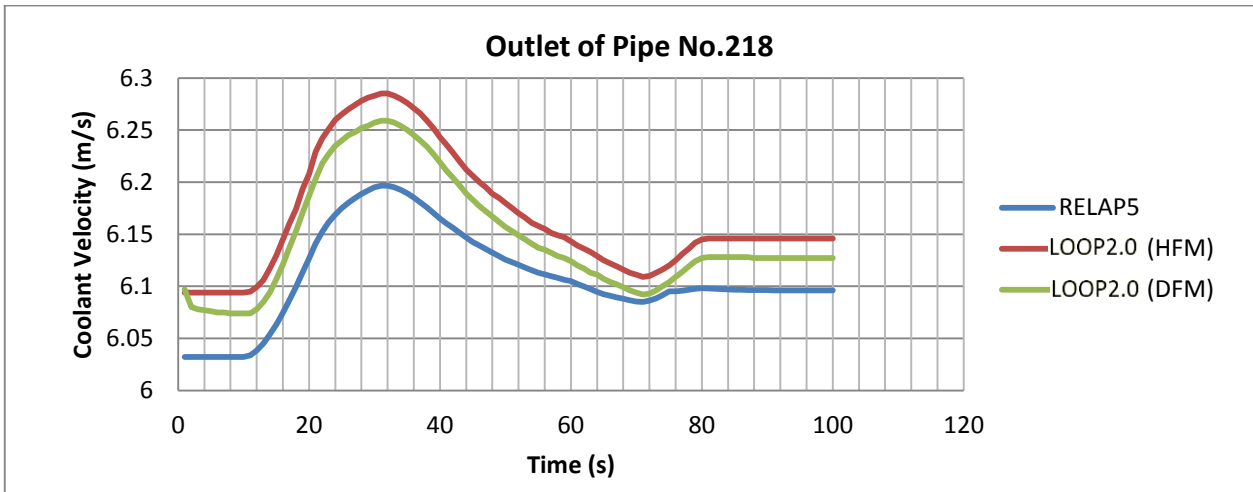
شکل ۵۸: تغییرات سرعت سیال در خروجی پمپ شماره ۲۰۷



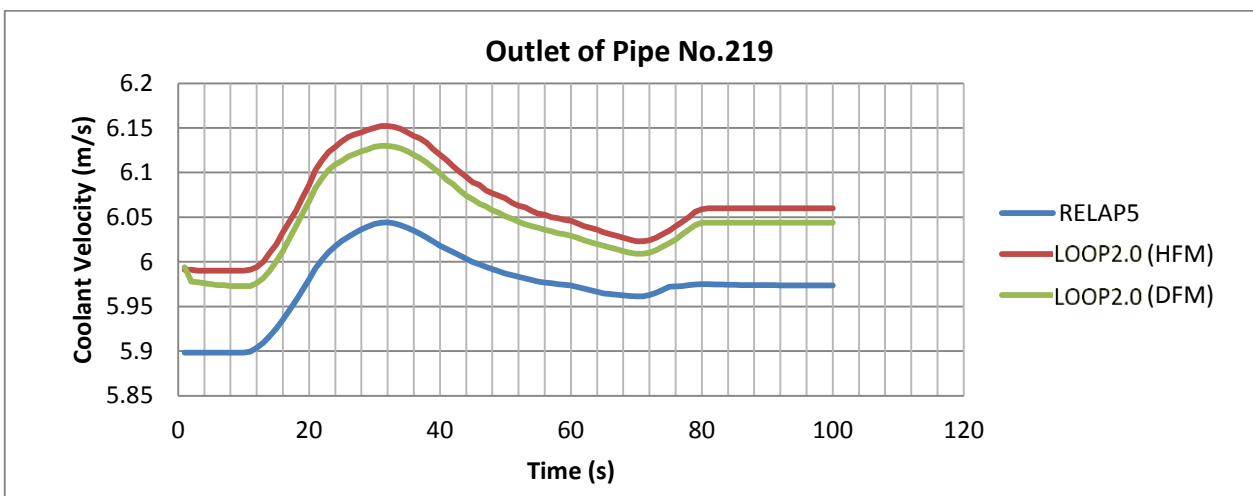
شکل ۵۹: تغییرات سرعت سیال در خروجی لوله شماره ۲۱۴ (پایین ریز ورودی به بخش پایینی راکتور)



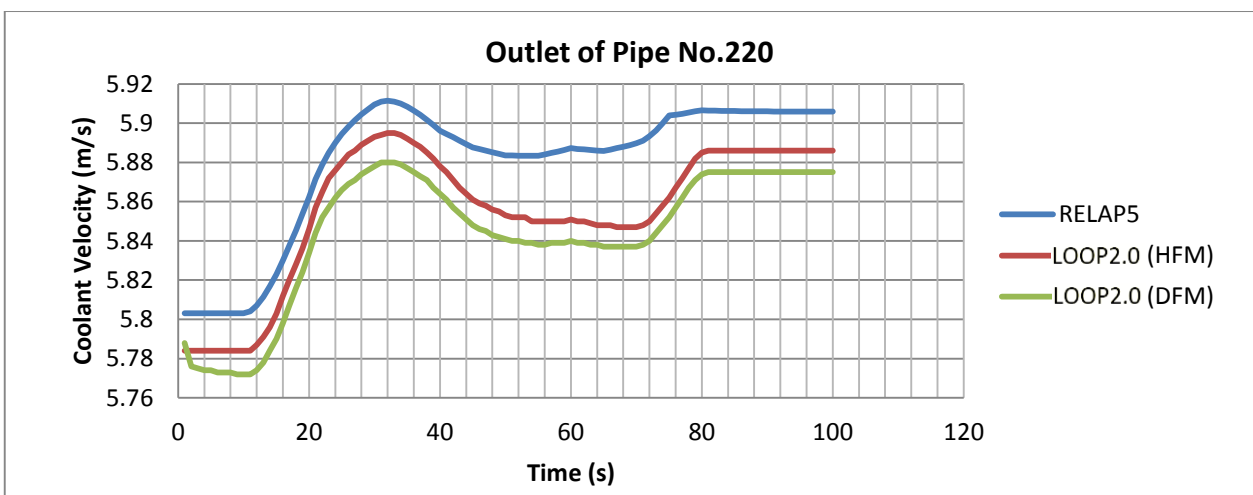
شکل ۶۰: تغییرات سرعت سیال در خروجی کانال شماره ۲۱۶ (کانال کنارگذر قلب راکتور)



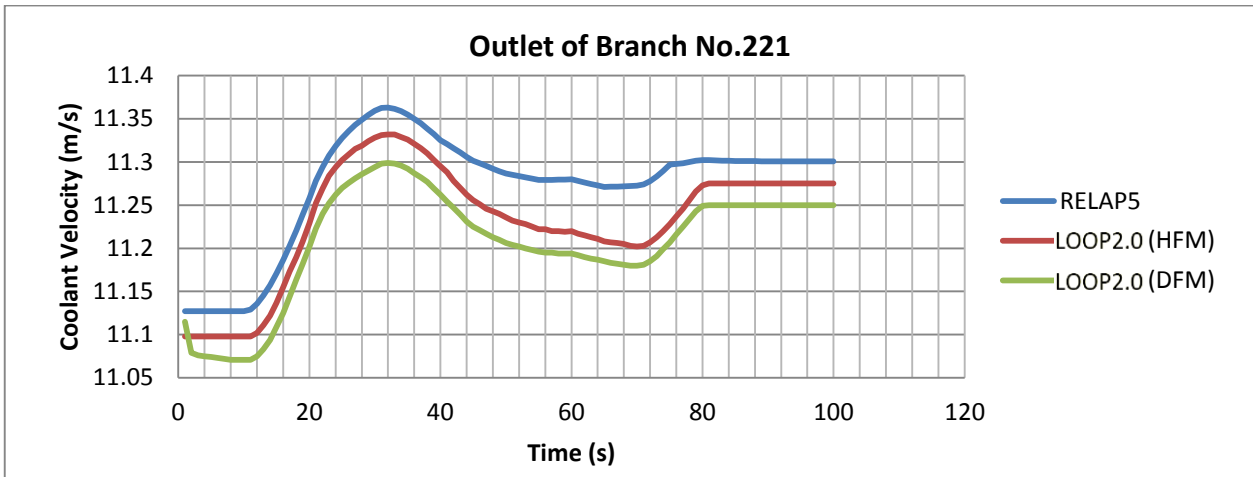
شکل ۶۱: تغییرات سرعت سیال در خروجی کانال شماره ۲۱۸ (کانال داغ قلب راکتور)



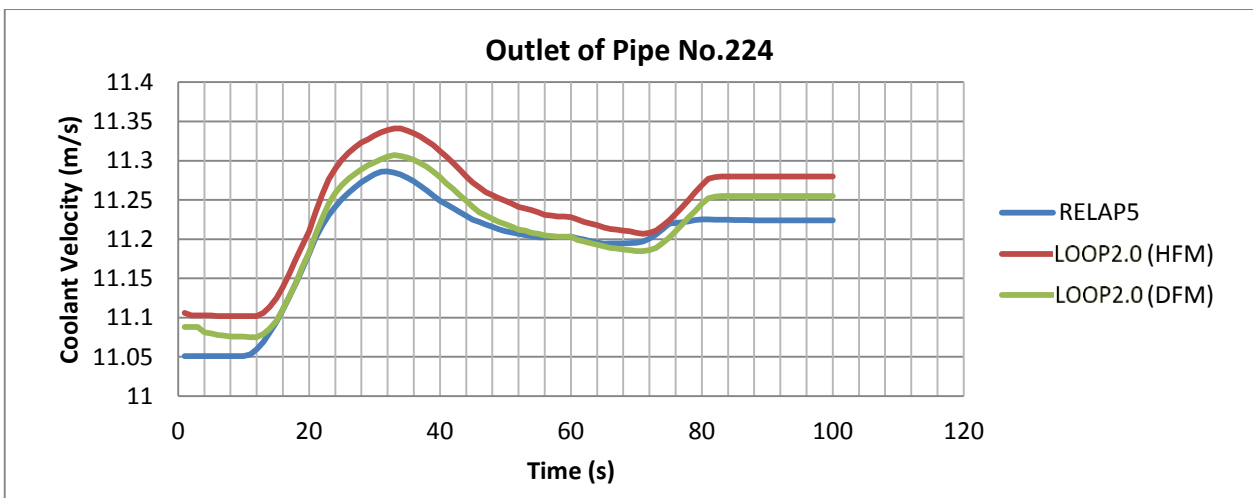
شکل ۶۲: تغییرات سرعت سیال در خروجی کانال شماره ۲۱۹ (کانال متوسط قلب راکتور)



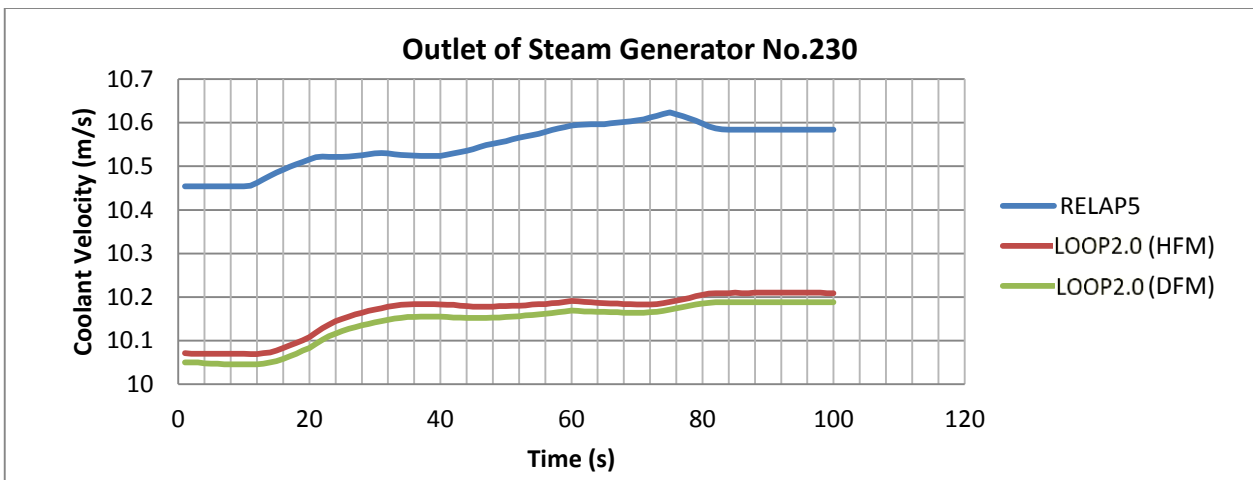
شکل ۶۳: تغییرات سرعت سیال در خروجی کانال شماره ۲۲۰ (کانال سرد قلب راکتور)



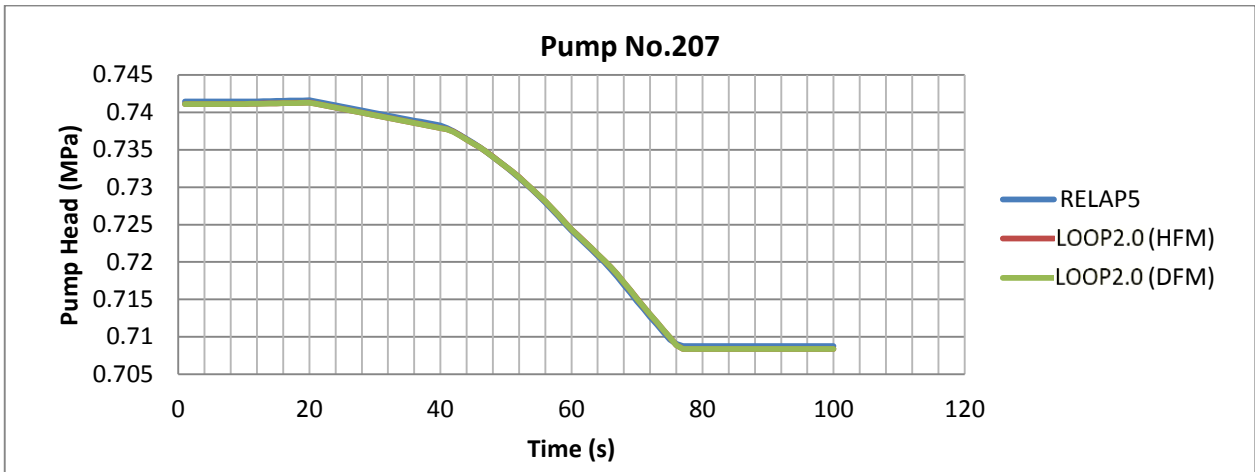
شکل ۶۴: تغییرات سرعت سیال در خروجی انشعاب شماره ۲۲۱ (خروجی محفظه راکتور)



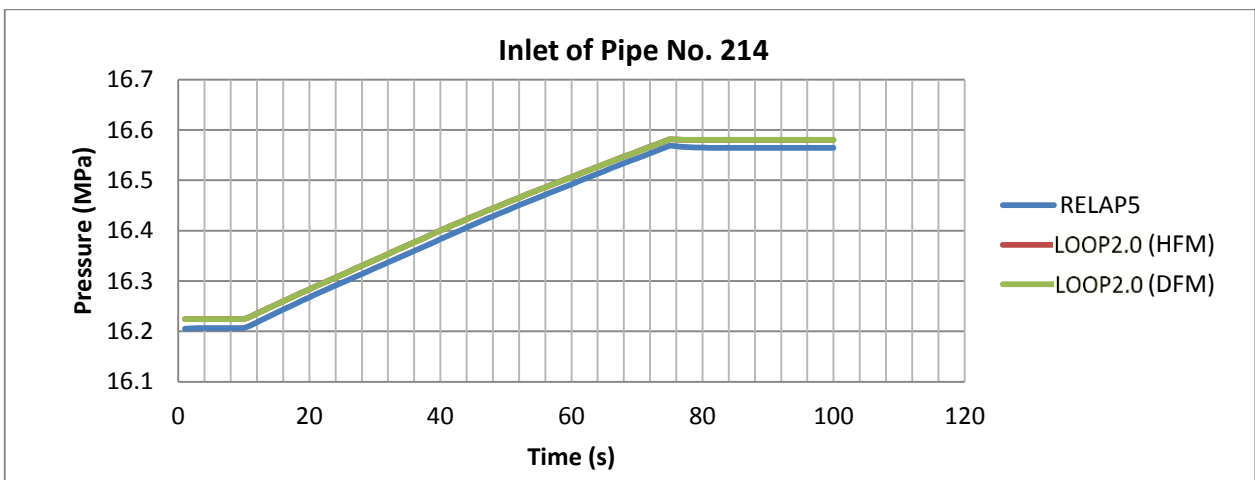
شکل ۶۵: تغییرات سرعت سیال در خروجی لوله شماره ۲۲۴ (ورودی مولد بخار)



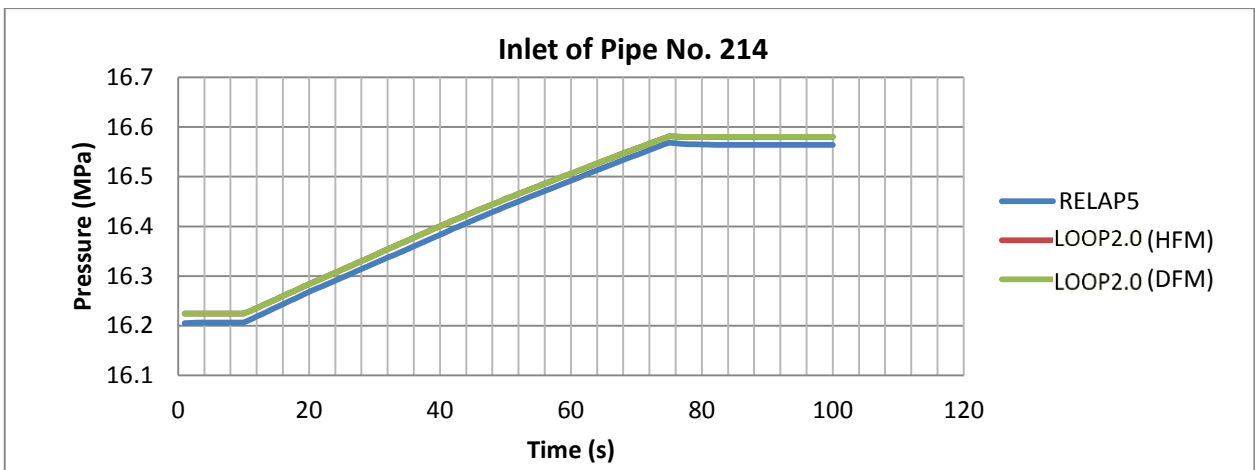
شکل ۶۶: تغییرات سرعت سیال در خروجی مولد بخار شماره ۲۳۰



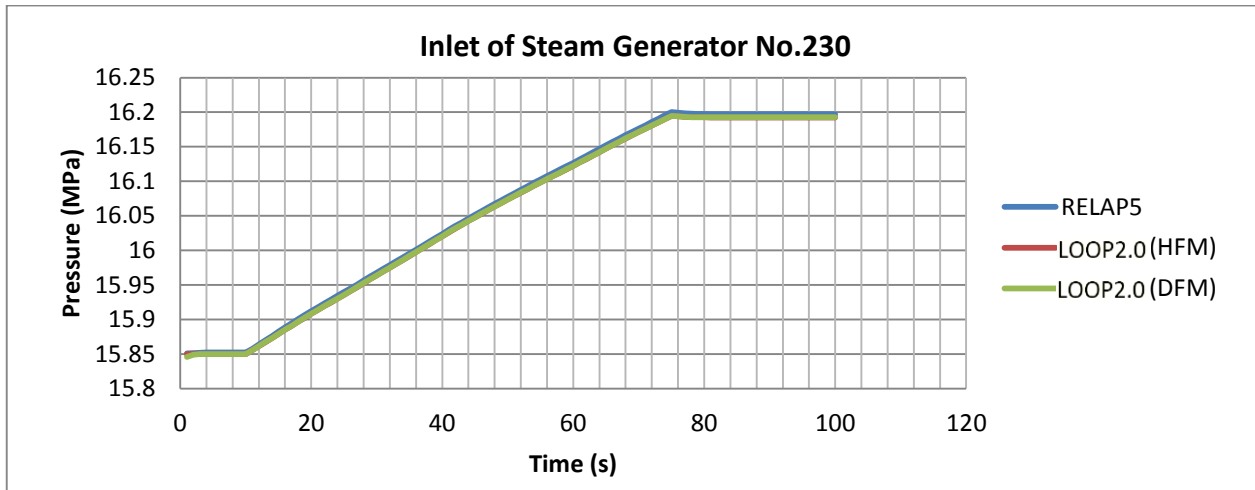
شکل ۶۷: تغییرات هد پمپ شماره ۲۰۷



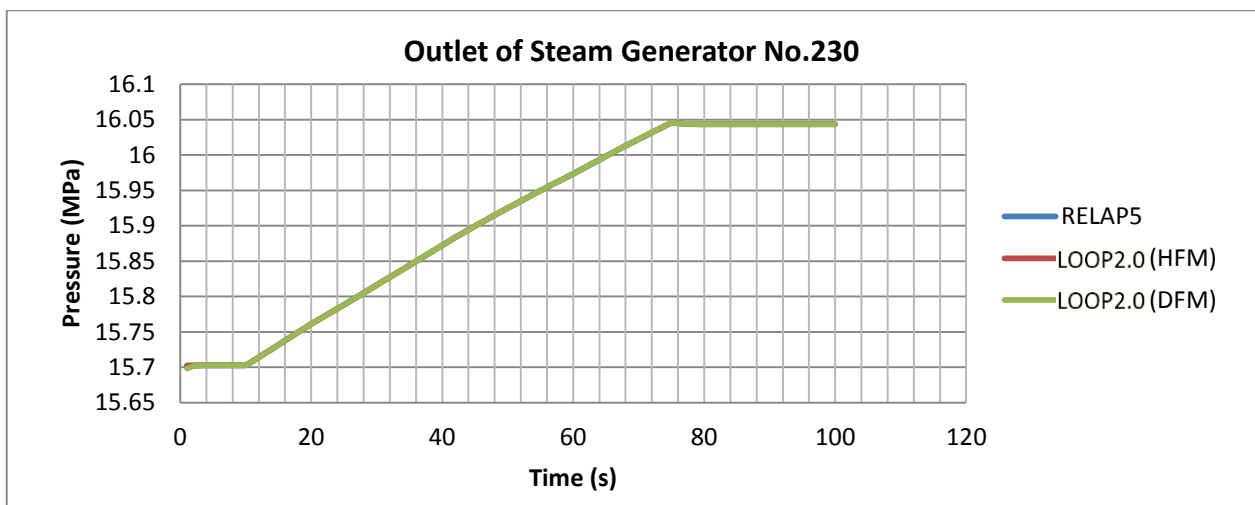
شکل ۶۸: تغییرات فشار سیال در ورودی محفظه راکتور (ورودی لوله شماره ۲۱۴)



شکل ۶۹: تغییرات فشار سیال در خروجی محفظه راکتور (خروجی انشعاب شماره ۲۲۱)



شکل ۷۰: تغییرات فشار در ورودی مولد بخار شماره ۲۳۰



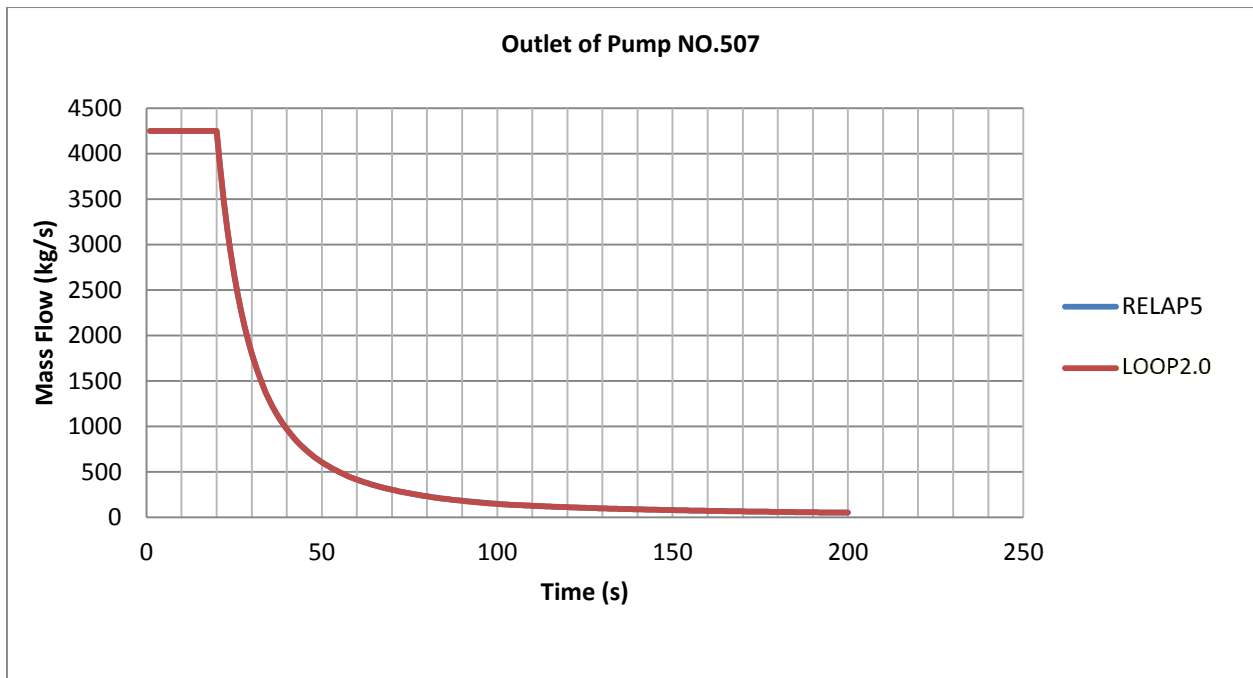
شکل ۷۱: تغییرات فشار در خروجی مولد بخار شماره ۲۳۰

همانطور که اشاره شد هدف از ارائه مسأله اول نشان دادن قابلیت محاسبات همزمان پارامترهای فشار، دما، دبی و توان تولیدی وابسته به زمان است. با وجود اختلاف در مدل‌های بکار رفته در کد LOOP2.0 و کد RELAP5، نتایج حاصل انطباق مناسبی را با کد RELAP5 نشان می‌دهد. از آنجا که پارامترهای محاسبه شده در این کد بسیار متعدد هستند و همچنین هر پارامتر در هر گام زمانی تکرار می‌شود، ارائه جدول حاوی نتایج محاسباتی حجم وسیعی را دربر خواهد گرفت و عملاً امکانپذیر نمی‌باشد. لذا به شکل‌های متعدد ارائه شده در این بخش برای مقایسه نتایج اکتفا شده است.

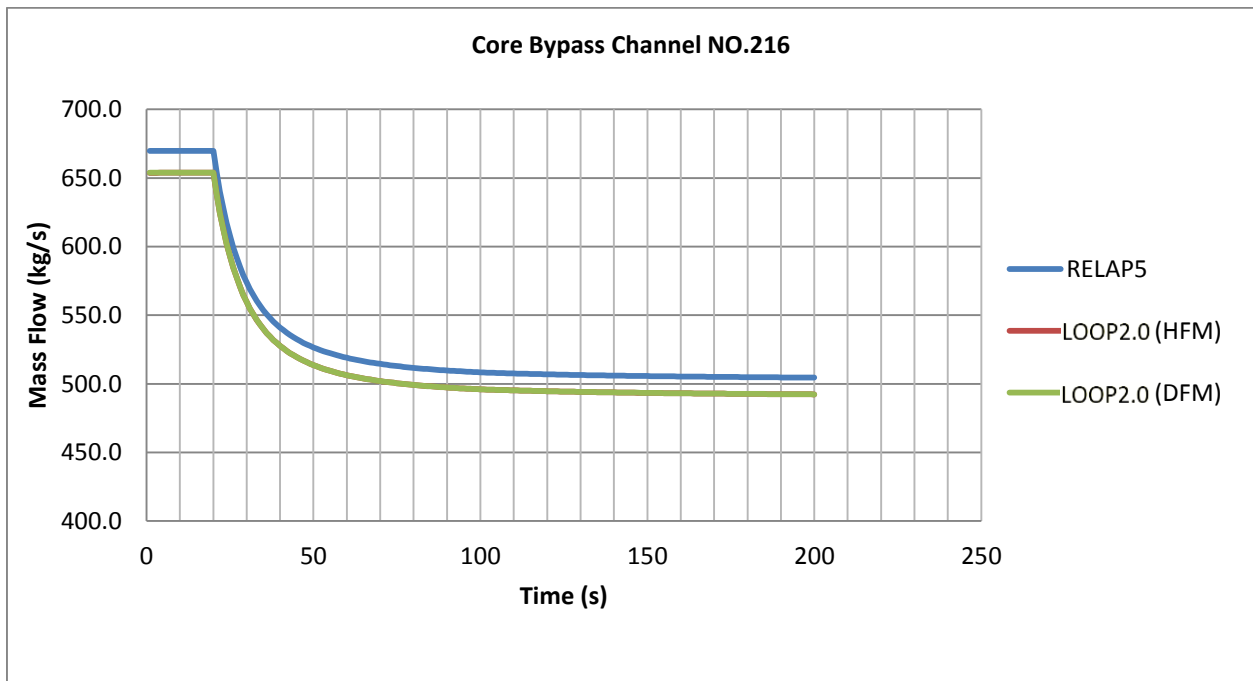
۱۴-۲-۳- مسأله دوم: بررسی گذره خاموشی پمپ

به منظور نشان دادن و بررسی قابلیت دیگر کد LOOP2.0 در حالت وابسته به زمان مسأله کاربردی دیگری مورد بررسی قرار گرفته است. در این مسأله گذره خاموش شدن یک و دو پمپ از پمپ‌های مدار اولیه بررسی می‌گردد. این گذره در حادثه کاهش سیال خنک کننده^۱ عبوری از مدار اولیه نیروگاه اتفاق می‌افتد. عبارت دیگر می‌توان گفت رویداد آغازگر حادثه کاهش سیال خنک کننده ناشی از خاموش شدن پمپ‌های گردش سیال است. در این مسأله شرایط اولیه بصورت شرایط نرمال عملکرد نیروگاه در نظر گرفته شده است و در ثانیه ۲۰،

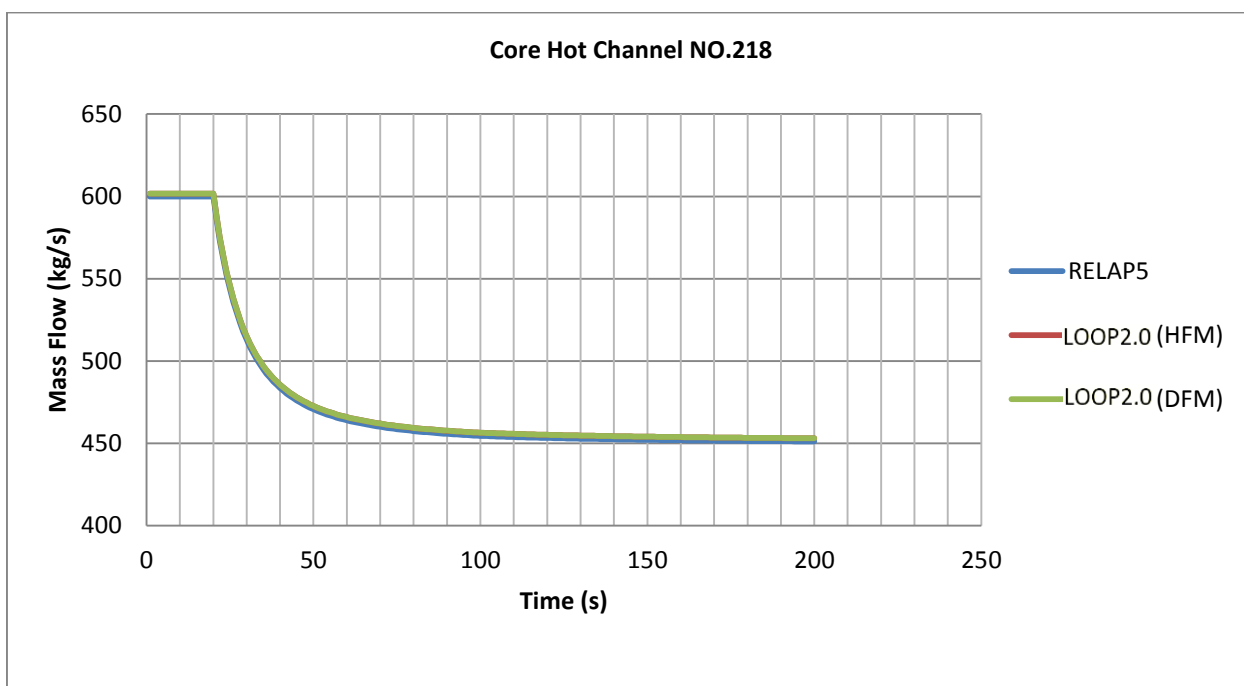
خاموشی پمپ اتفاق می‌افتد. با استفاده از کد رفتار دمای سیال در قلب راکتور در حالت خاموشی یک و دو پمپ در شکل‌های ۷۲ تا ۸۵ نشان داده شده است. در این مسأله علاوه بر بررسی قابلیت مدل‌سازی خاموشی پمپ توسط کد LOOP2.0، قابلیت مدل‌سازی جریان دوفاز با خاموش شدن دو پمپ نیز در شکل‌های ۸۴ و ۸۵ نشان داده شده است.



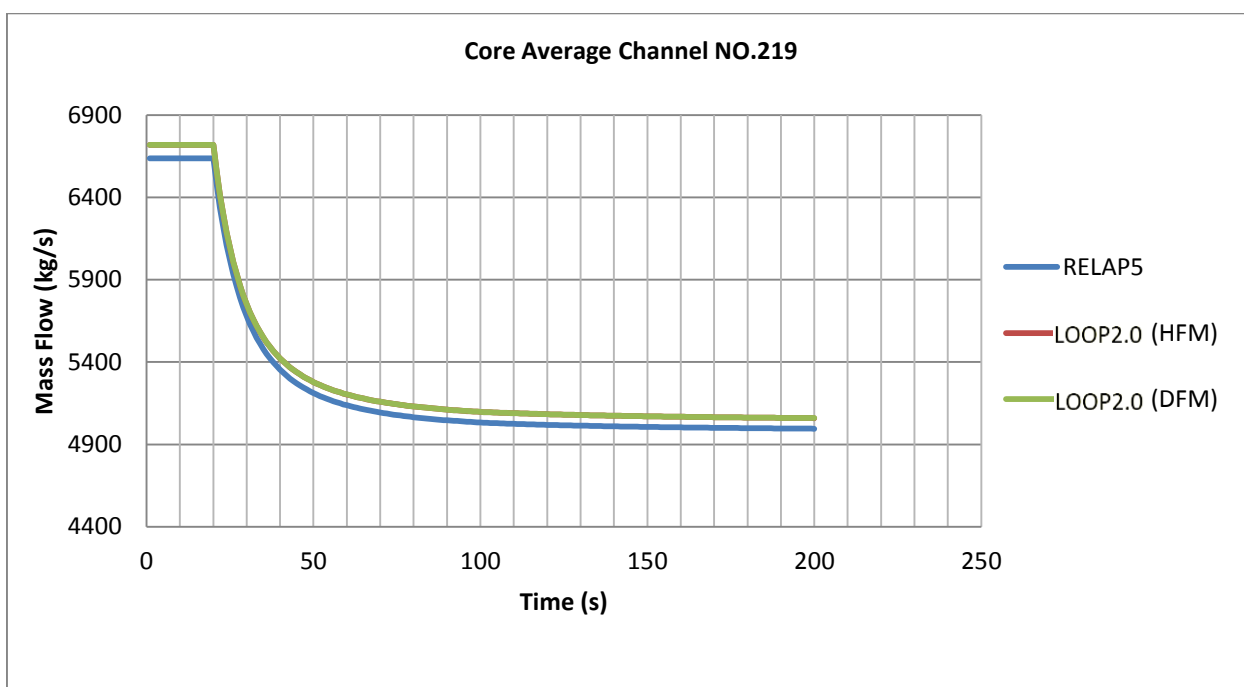
شکل ۷۲: تغییرات دبی سیال محاسبه شده پس از خاموشی پمپ



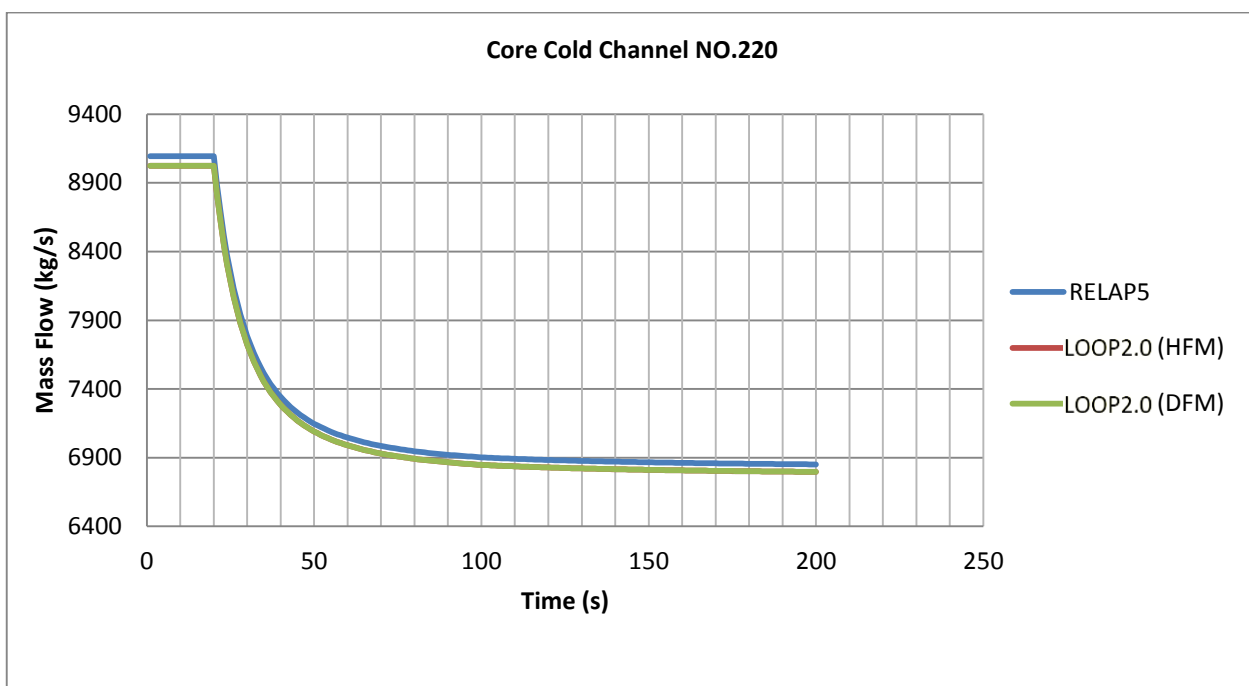
شکل ۷۳: تغییرات دبی سیال عبوری از کانال کنارگذر قلب راکتور در حالت خاموشی یک پمپ



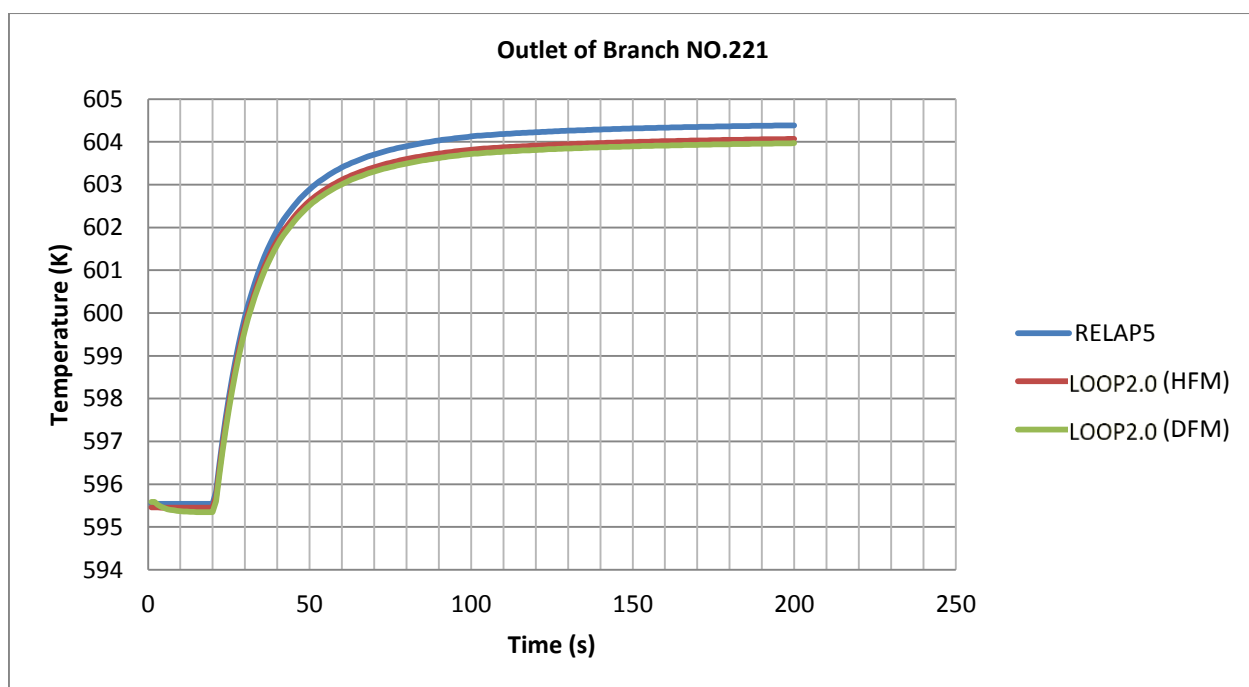
شکل ۷۴: تغییرات دبی سیال عبوری از کانال داغ قلب راکتور در حالت خاموشی یک پمپ



شکل ۷۵: تغییرات دبی سیال عبوری از کانال متوسط قلب راکتور در حالت خاموشی یک پمپ



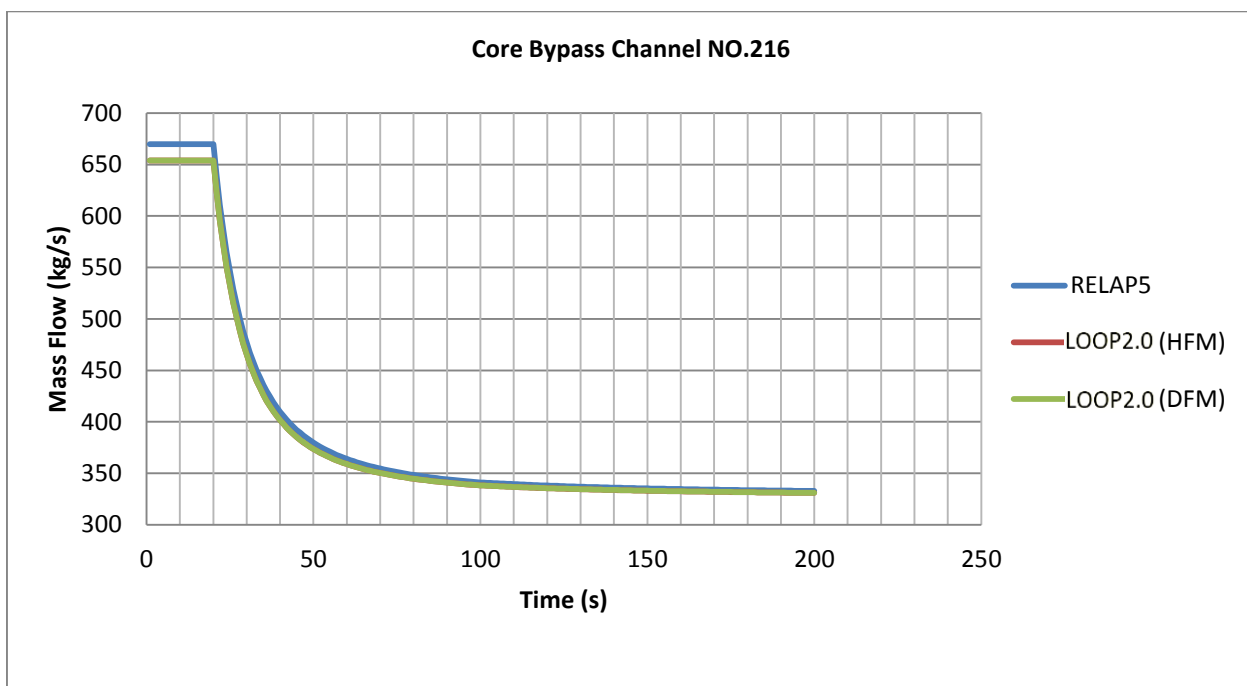
شکل ۷۶: تغییرات دبی سیال عبوری از کانال سرد قلب راکتور در حالت خاموشی یک پمپ



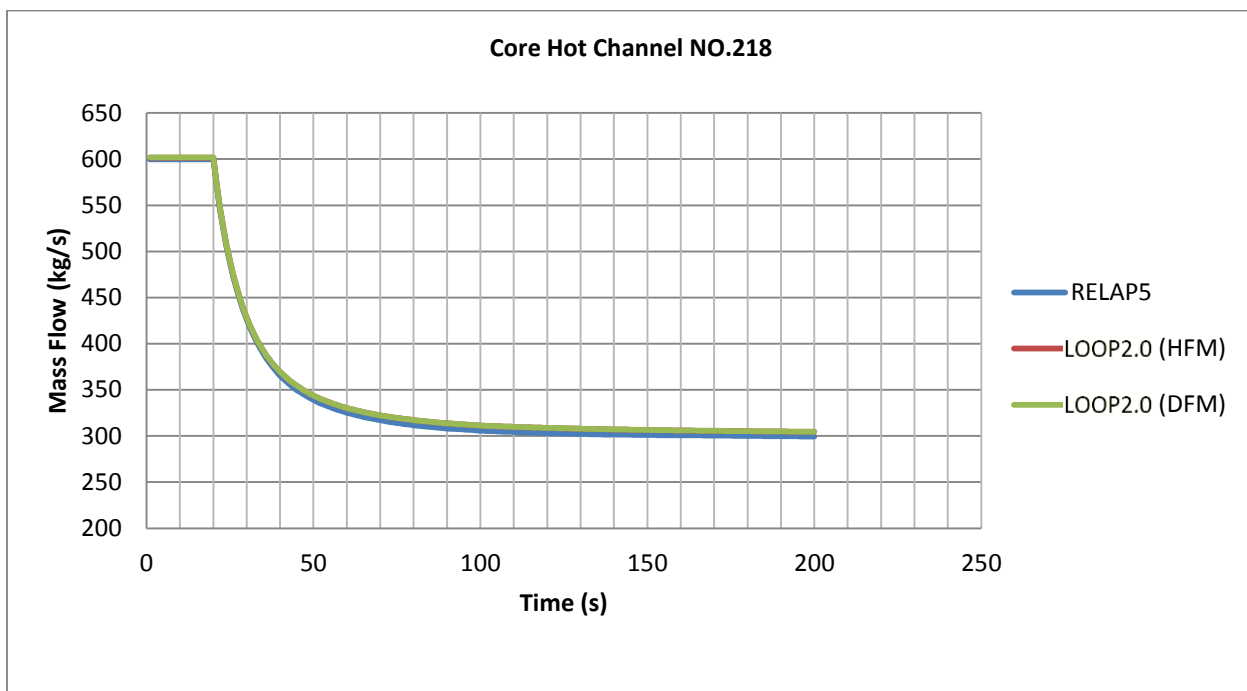
شکل ۷۷: تغییرات دمای سیال خروجی از قلب راکتور در حالت خاموشی یک پمپ



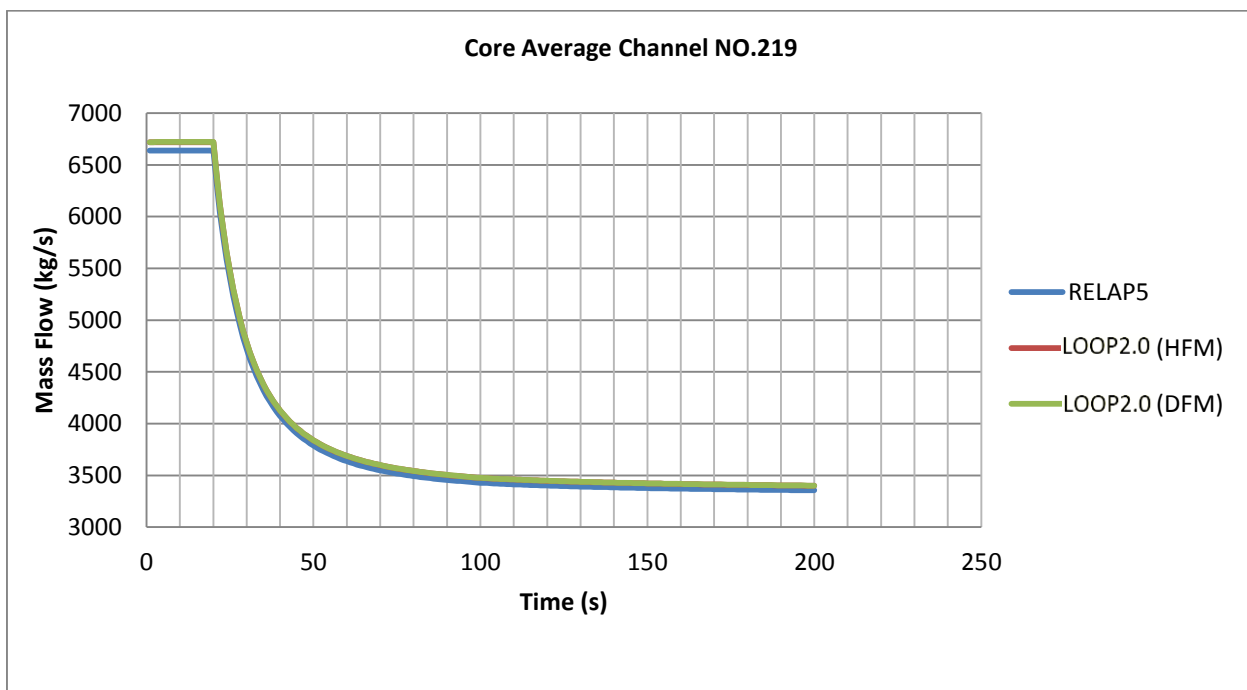
شکل ۷۸: تغییرات دبی سیال در ورودی قلب راکتور در حالت خاموشی دو پمپ



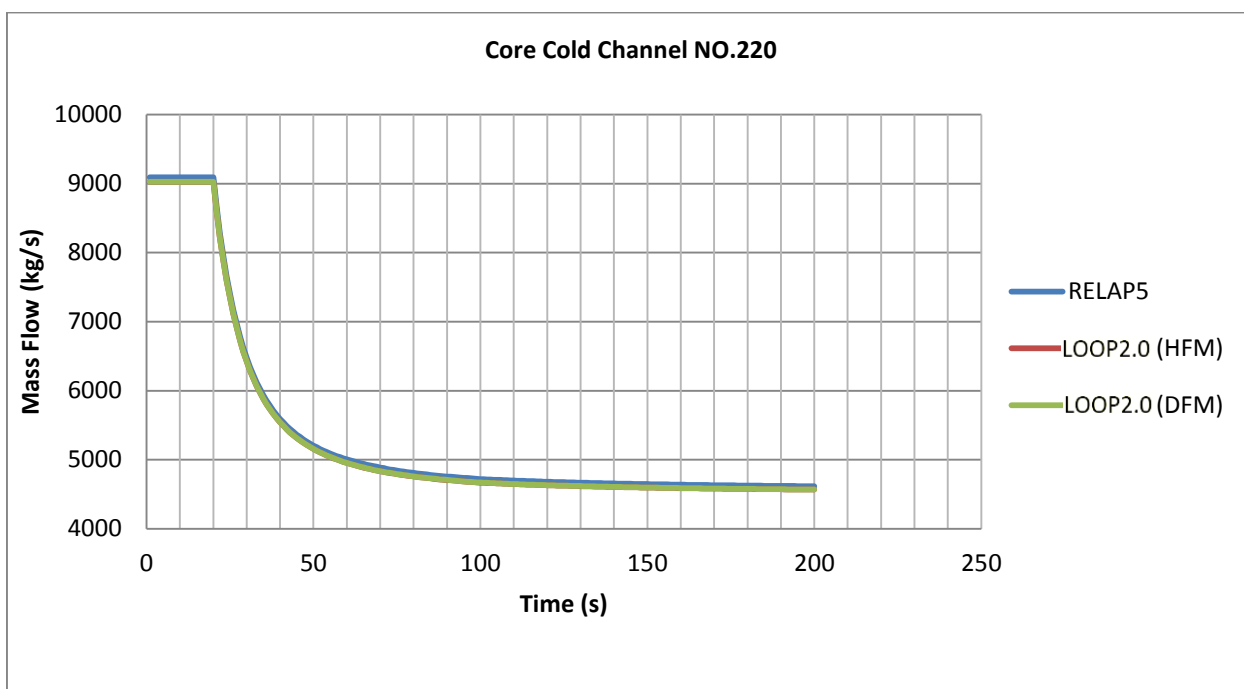
شکل ۷۹: تغییرات دبی سیال عبوری از کانال کنارگذر قلب راکتور در حالت خاموشی دو پمپ



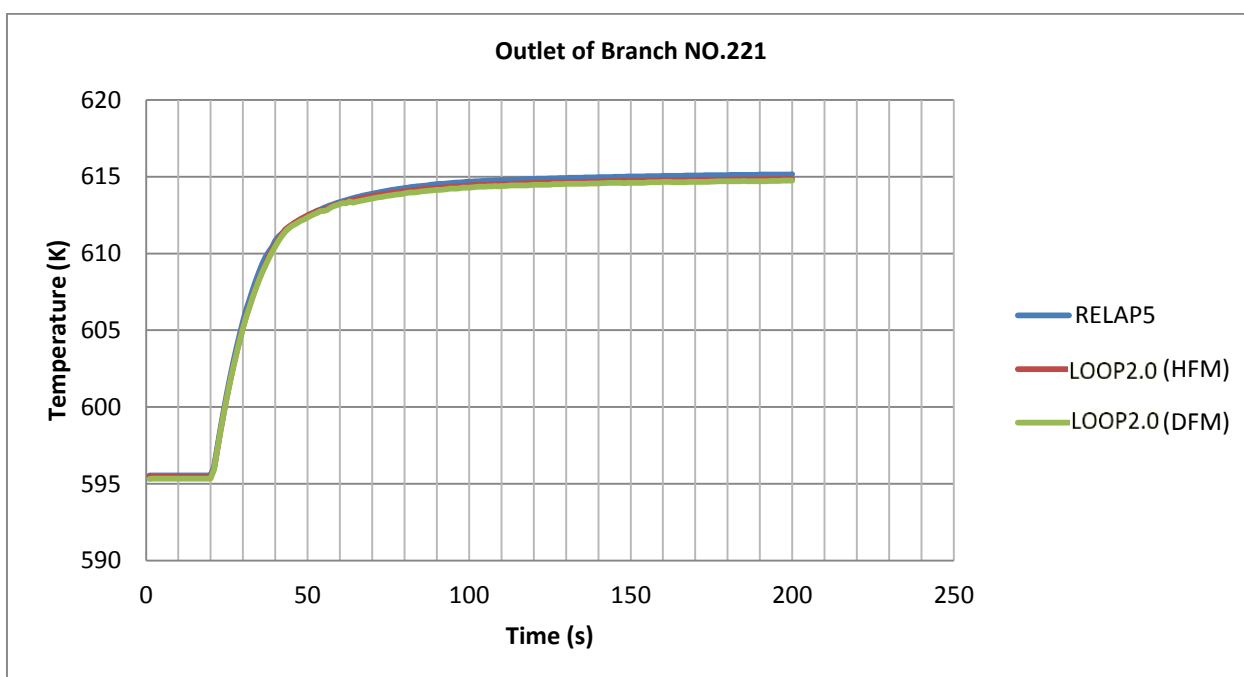
شکل ۸۰: تغییرات دبی سیال عبوری از کانال داغ قلب راکتور در حالت خاموشی دو پمپ



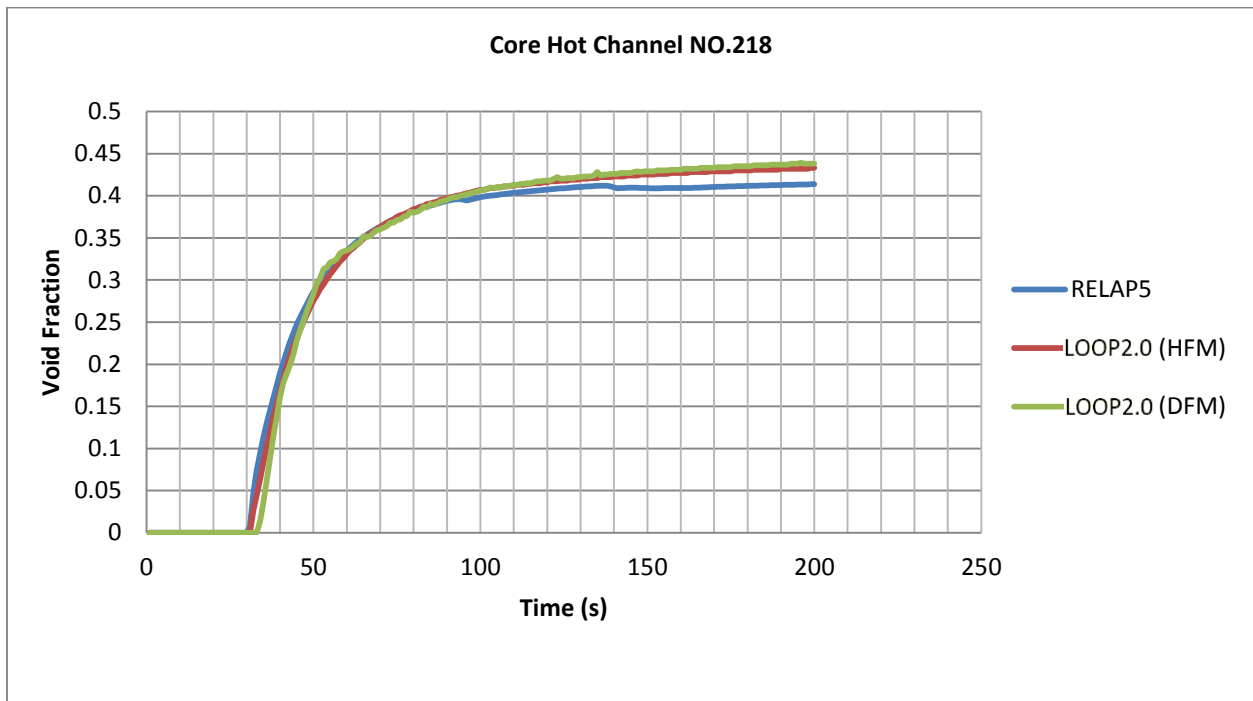
شکل ۸۱: تغییرات دبی سیال عبوری از کانال متوسط قلب راکتور در حالت خاموشی دو پمپ



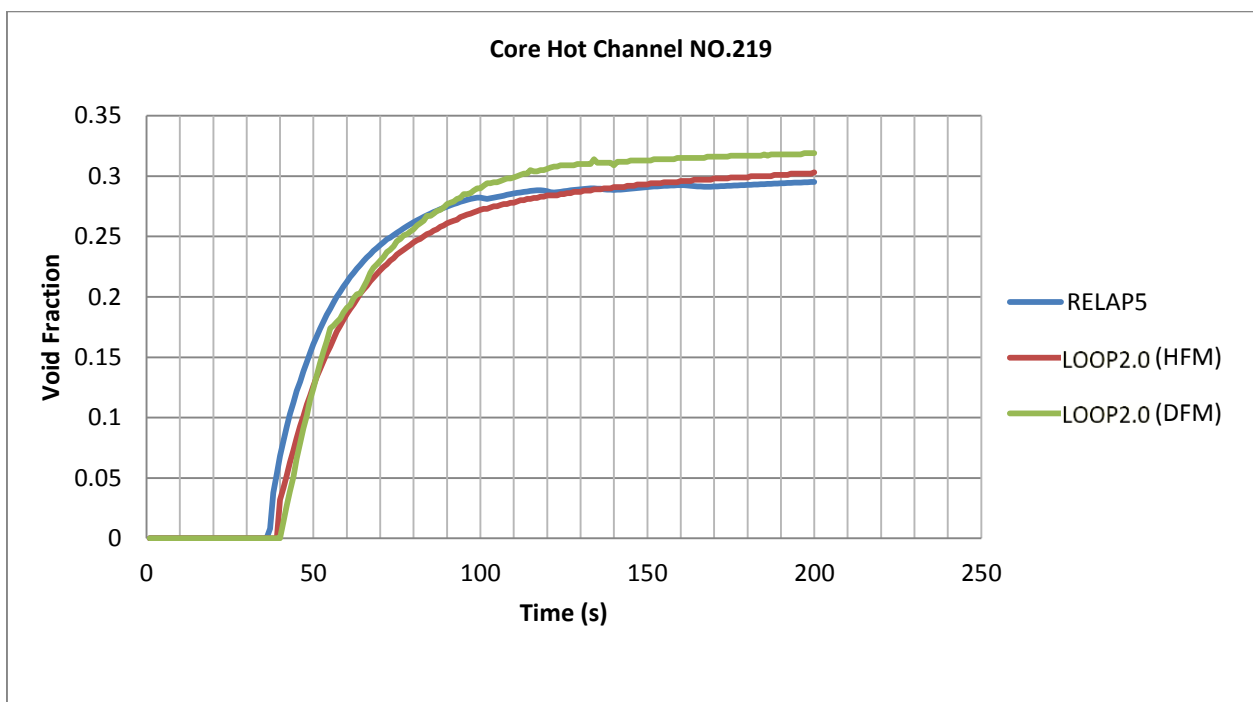
شکل ۸۲: تغییرات دبی سیال عبوری از کانال سرد قلب راکتور در حالت خاموشی دو پمپ



شکل ۸۳: تغییرات دمای خروجی قلب راکتور در حالت خاموشی دو پمپ



شکل ۸۴: تغییرات کسر حجمی بخار خروجی از کانال داغ قلب راکتور در حالت خاموشی دو پمپ



شکل ۸۵: تغییرات کسر حجمی بخار خروجی از کانال متوسط قلب راکتور در حالت خاموشی دو پمپ

هدف از ارائه این مسأله نشان دادن قابلیت کد LOOP2.0 در مدل‌سازی گذره کاهش جریان عبوری در مدار اولیه هنگام خاموشی پمپ و محاسبه دبی جریان سیال در مدار پس از خاموشی بر اساس اینرسی پروانه پمپ است. در حادثه کاهش سیال خنک کننده در مدار اولیه، پس از خاموشی پمپ سناریو ادامه پیدا می‌کند تا جایی که حادثه مهار می‌شود. در این حادثه پس از خاموشی پمپ، تولید توان در راکتور متوقف می‌شود. در این مسأله خاموشی راکتور پس از توقف پمپ در نظر گرفته نشده است تا قابلیت مدل‌سازی جریان دوفاز توسط کد نشان داده شود. نتایج حاصل نشان می‌دهد با توقف یک پمپ جریان سیال در کانال‌های قلب دو فاز نمی‌شود ولی با خاموش شدن دو پمپ جریان

سیال در قلب راکتور شروع به جوشش می‌کند و شرایط دوفاز در مسأله ایجاد می‌گردد. شکل‌های ارائه شده، علیرغم تفاوت در روش حل و مدل‌های جریان دوفاز، تطابق مناسبی را بین نتایج حاصل از کد LOOP2.0 و کد RELAP5 نشان می‌دهند. بر اساس مسائل بررسی شده می‌توان گفت کد ارائه شده LOOP2.0 قابلیت انجام محاسبات ترموهیدرولیکی مدار شامل اجزای کانال، انشعاب، اتصالات، پمپ و مولد بخار در حالت گذرای توان راکتور و حالت‌های گذرای دبی، دما، فشار و کیفیت در ورودی مدار با بهره‌گیری از مدل‌های دوفاز همگن و شار رانشی و همچنین حالت گذرای خاموشی پمپ را دارد.

۱۵- نتیجه‌گیری

در این گزارش، کد محاسبات ترموهیدرولیکی مدار شامل اجزای کانال، انشعاب، اتصالات، پمپ و مولد بخار در حالت گذرای توان، دبی، دما، فشار و کیفیت با مدل‌های دوفاز همگن و شار رانشی ارائه گردید. برای نشان دادن قابلیت‌ها و همچنین صحت محاسبات این کد، دو مسأله بررسی و نتایج حاصل با نتایج حاصل از کد RELAP5 مقایسه گردید. نتایج حاصل از برنامه تطابق خوبی با نتایج حاصل از کد RELAP5 دارد. دلیل اصلی اختلاف اندک در برخی موارد بین نتایج تفاوت مدل‌های بکار رفته در دو کد است. لازم به ذکر است سایر اجزای مدار مانند انباره‌های سیستم‌های ایمنی، توربین و فشارنده در این نسخه از کد لحاظ نشده‌اند.

۱۶- مراجع

1. 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.
2. The RELAP5 Code Development Team. "RELAP5/MOD3 code manual volume I: code structure, system models, and solution methods", Idaho National Engineering Laboratory, 1st Edition, 1995.
3. "Thermo-physical properties of materials for water cooled reactors", International Atomic Energy Agency, IAEA-TECDOC-949, 1997.
4. Ishii, M., Hibiki, T., "Thermo-fluid dynamics of two-phase flow". Springer, 2006.
5. John G. Collier, John R. Thom. "Convective boiling and condensation", 3rd Edition, 1994.
6. F. M. White. "Fluid Mechanics", McGraw-Hill, 4th Edition.
7. Sadik Kakac, Hongton Liu., "Heat exchangers selection, rating and thermal design", CRC Press, 2nd Edition, Florida, 2002.
8. Neil E. Todreas, Mujid S. Kazimi, "Nuclear System I", 1993.
9. Final Safety Analysis Report (FSAR), Chapter 4, Reactor, Atomic Energy Organization of IRAN, 2003.
10. The RELAP5 Code Development Team. "RELAP5/MOD3 Code Manual Volume IV", Idaho National Engineering Laboratory, 1st Edition, 1995.
11. Kwi-Seok Ha, Hae-Young Jeong, Young-Min Kwon, Won-Pyo Chang, Eui-Kwang Kim, and Yong-Bum Lee, "Prediction of void fraction in subcooled boiling", Transactions of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting, Busan, Korea, October 27-28, 2005.