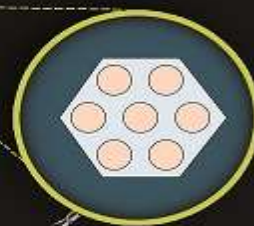
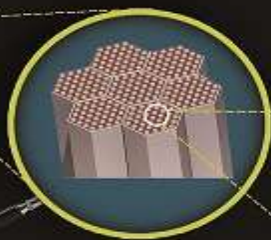
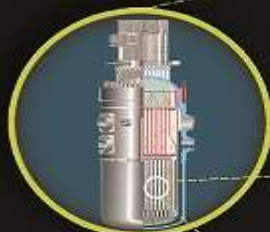


COBRA-EN

(مدل سازی، تحلیل و ارتقا کد)



ترجمه و تألیف :

رحمان قراری، امیرحسین صفاری نوش آبادی، نعیم الدین مناجی کجوری

ج	پیشگفتار
۱	فصل اول: انواع کدهای ترموهیدرولیکی
۲	۱-۱ طبقه‌بندی کدهای ترموهیدرولیکی
۲	۱-۱-۱ کدهای با قابلیت تحلیل سیستم
۵	۱-۱-۲ نوع مدل‌سازی جریان دوفاز
۶	۱-۱-۳ محدوده‌ی کاربرد
۶	۱-۱-۴ نوع کاربرد
۷	۲-۱ خلاصه و جمع‌بندی مطالب فصل
۱۱	۳-۱ مراجع
۱۲	فصل دوم: آشنایی با کد ترموهیدرولیکی COBRA
۱۲	۱-۲ کد ترموهیدرولیکی COBRA-EN
۱۳	۱-۲-۱ روش کانال جریان
۱۵	۱-۲-۲ فرم تفاضل محدود معادلات بقا
۲۳	۲-۲ روش‌های حل عددی
۲۳	۱-۲-۲ حل معادله‌ی انرژی
۲۴	۲-۲-۲ روش حل گرادیان فشار
۲۷	۳-۲-۲ روش نیوتن رافسون
۳۰	۳-۲ مدل کسر بخار بر اساس معادلات بقای جرمی بخار و معادلات لغزش
۳۵	۴-۲ مدل ترموهیدرولیکی TWIGL
۳۵	۵-۲ معادله‌ی موازنه‌ی جرم بور
۳۸	۶-۲ مدل‌های تشکیل‌دهنده‌ی جریان دوفازی
۳۸	۱-۶-۲ معادلات افت فشار تک‌فاز
۳۹	۲-۶-۲ ضریب اصطکاک دوفازی
۴۰	۳-۶-۲ مدل‌های جوشش زیر اشباع
۴۲	۴-۶-۲ معادلات کسر و کیفیت بخار
۴۴	۵-۶-۲ مدل تولید بخار
۴۵	۶-۶-۲ مدل نسبت لغزش
۴۶	۷-۶-۲ خصوصیات ترمودینامیکی و ترموفیزیکی آب
۴۶	۷-۲ مدل‌های انتقال حرارت

۴۷	۱-۷-۲ مدل هدایت حرارتی میله‌ی سوخت
۵۱	۲-۷-۲ مدل انتقال حرارت از سطح میله‌ی سوخت به سیال
۵۴	۳-۷-۲ معادلات محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت
۶۱	۴-۷-۲ معادلات شار حرارتی بحرانی
۶۹	۵-۷-۲ توان بحرانی
۷۰	۶-۷-۲ مدل هدایت شکاف
۷۱	۸-۲ شرایط مرزی، توابع نیرو و همگرایی
۷۳	۹-۲ خلاصه و جمع بندی مطالب فصل
۷۳	۱۰-۲ مراجع
۷۴	فصل سوم: ورودی کد COBRA-EN
۷۴	۱-۳ انواع مدل سازی در کد
۷۴	۱-۱-۳ مدل سازی مجتمع‌های سوخت
۷۴	۲-۱-۳ مدل سازی چند میله‌ی سوخت یا یک مجتمع سوخت
۷۵	۲-۳ کارت‌های ورودی کد
۹۳	۳-۳ خلاصه و جمع بندی مطالب فصل
۹۴	۴-۳ مراجع
۹۵	فصل چهارم: مسایل حل شده با کد COBRA-EN
۹۶	۱-۴ مسایل کاربردی
۱۵۴	۲-۴ خلاصه و جمع بندی مطالب فصل
۱۵۴	۳-۴ مراجع
۱۵۵	فصل پنجم: اصلاح کد COBRA-EN
۱۵۵	۱-۵ تفاوت قلب راکتورهای غربی و روسی
۱۵۶	۱-۱-۵ اصلاح متن کد COBRA-EN برای در نظر گرفتن حفره‌ی مرکزی سوخت
۱۵۷	۲-۱-۵ رفع محدودیت تعداد صفحات مشبک با اصلاح متن کد COBRA-EN
۱۵۷	۳-۱-۵ رفع مشکل هندسه
۱۵۹	۴-۱-۵ انتخاب خط تقارن برای مدل سازی قلب راکتور
۱۵۹	۵-۱-۵ انتخاب نوع غلاف
۱۶۰	۲-۵ ارزیابی صحت نتایج کد اصلاح شده
۱۶۳	۳-۵ خلاصه و جمع بندی مطالب فصل

۱۶۳

۱۶۴

۴-۵ مراجع

واژه‌نامه

پیشگفتار

جنبه‌های مختلف طراحی قلب یک راکتور هسته‌ای به چند مبحث اساسی شامل طراحی هسته‌ای، طراحی هیدرولیکی-حرارتی، طراحی ساختار و انتخاب مواد و ارزیابی اقتصادی وابسته است. در انجام محاسبات همه‌ی این مباحث، الزامات و قیود ایمنی هسته‌ای، باید بدون هرگونه مصالحه‌ای، بجز آنچه در اصول ایمنی پرتوی ملاحظه شده است، اعمال شوند. طراحی راکتور باید سازگار با الزامات کلی و مقررات اختصاصی و منطبق با بالاترین استانداردهای ایمنی هسته‌ای بوده و در آن از استانداردهای صنعتی با مشخصه‌ی قابل استفاده در صنایع هسته‌ای بهره گرفته شده باشد. به همین دلیل ایمنی یکی از مهم‌ترین ارکان طراحی تأسیسات هسته‌ای است. ایمنی هسته‌ای به معنی حفاظت از کارکنان، مردم و محیط زیست در قبال اثرات زیان بار پرتوهای یونیزان است و در عمل به مجموعه‌ای از تمهیدات و اقداماتی اطلاق می‌شود که برای رسیدن به دو هدف اصلی، کنترل و بهره‌برداری ایمن از تأسیسات هسته‌ای و حفاظت از کارکنان، افراد جامعه و محیط زیست در برابر مخاطرات و اثرات زیان‌آور پرتوهای یونیزان انجام می‌شوند. این تمهیدات و اقدامات برای چرخه‌ی کامل حیاتی یک مؤسسه‌ی هسته‌ای شامل طراحی، ساخت، راه‌اندازی، بهره‌برداری و از کاراندازی تأسیسات هسته‌ای در نظر گرفته می‌شوند. ایمنی هسته‌ای از سال‌های اولیه‌ی پیدایش صنعت هسته‌ای تا به امروز، مسیر پر فراز و نشیبی را در جهت تبیین و تثبیت جایگاه و شمول خود در این صنعت طی کرده است، به ویژه پس از وقوع حوادث سخت هسته‌ای در نیروگاه تری مایل آیلند آمریکا در دهه‌ی ۱۹۷۰، چرنوبیل شوروی سابق در دهه‌ی ۱۹۸۰ و فوکوشیمای ژاپن در ۲۰۱۱ ایمنی هسته‌ای و رعایت استانداردها و ارتقای آن هم از نظر مفاهیم، مباحث نظری، محاسباتی و هم از نظر جنبه‌های فنی، تکنیکی و فناوری حیاتی‌ترین مباحث در پیشبرد پروژه‌های هسته‌ای است. اینک ایمنی به دلیل نقش آن در توسعه‌ی پایدار هسته‌ای، به موتور محرکه‌ی پیشرفت در فناوری نوین هسته‌ای تبدیل شده است.

معمولاً طراحی مهندسی نیروگاه‌های هسته‌ای به نحوی انجام می‌شود که در مقابل مجموعه‌ی محدودی از حوادث طبیعی، غیرطبیعی و انسان‌ساز مؤثر بر ایمنی هسته‌ای که انتظار می‌رود حتی با احتمال بسیار کم رخ دهند، یک پارچگی و کارایی‌شان حفظ شود. به دلیل اهمیت و تأثیر حوادث در تعیین مشخصات عناصر شکل‌دهنده و اجزای یک نیروگاه هسته‌ای، طراحی نیروگاه از یک طرف نیازمند محاسبات مهندسی پیچیده‌ای است که با استفاده از روش‌های محاسباتی عددی بتواند شرایط مختلف مادی، هندسی و زمانی را با دقت لازم پوشش دهد و از طرف دیگر برای حصول اطمینان از توانایی و صحت روش‌ها، فرض‌ها و مدل‌های استفاده‌شده در طراحی برای حل مسایل مهندسی موضوعات در مواجهه با شرایط عملی در حد ممکن سیستم‌ها و اجزای اصلی راکتور و

نیروگاه تا حد امکان شبیه‌سازی شوند. شبیه‌سازی به دو روش محاسباتی و ساخت نمونه یا مدل تست انجام می‌گیرد. مدل تست معمول‌ترین راهی است که برای ارزیابی عملکرد سیستم واقعی در مواجهه با شرایط فوق به کار می‌آید که معمولاً در ابعاد بسیار کوچک‌تر از نیروگاه ساخته می‌شوند و با استفاده از روش تحلیل ابعادی نتایج آزمایشات در این وسیله‌ها را به نیروگاه واقعی تعمیم می‌دهند. البته ساخت این وسیله‌ها معمولاً پرهزینه بوده و تطابق نتایج تست با رفتار سیستم‌های واقعی دشوار است؛ اما امکان انجام انواع آزمایشات به شکل ایمن، استفاده از این تجهیزات را رایج کرده است. روش دیگر شبیه‌سازی، بهره‌گیری از نرم‌افزارها و کدهای کامپیوتری است که برای مدل کردن این حالت‌ها و وقایع، طراحی شده و توسعه یافته‌اند. استفاده از این کدها مشکلات اتلاف وقت، هزینه‌ی نیروی انسانی، هزینه‌ی ساخت تجهیزات و همچنین احتمال بروز خطر هنگام تست را از بین می‌برد و امکان مدل‌سازی بازه‌ی گسترده‌ای از حالت‌های گذرا و حوادث در زمینه‌های مختلف ترموهیدرولیکی و نوترونیکی را فراهم می‌آورد. مهم‌ترین چالش در استفاده از این کدها اعتماد به نتایج خروجی آن‌ها در تطابق با رفتار واقعی سیستم است. از این‌رو، کاربران به بررسی و ارزیابی نتایج آن‌ها می‌پردازند تا از صحت پیش‌بینی‌های ارایه‌شده اطمینان حاصل کنند. با توجه به مطالب بیان‌شده، استفاده از کدهای کامپیوتری بسیار رایج اهمیت هستند. برای همین منظور در این تألیف به معرفی یکی از کدهای شبیه‌سازی در زمینه‌ی ترموهیدرولیکی پرداخته شده است.

کد COBRA، یکی از کدهای مهم در زمینه‌ی تحلیل ترموهیدرولیکی قلب رآکتور هسته‌ای است. تولید و ویرایش‌های اولیه‌ی این کد به دهه‌ی هفتاد قرن گذشته میلادی برمی‌گردد و ویرایش جدیدی از کد COBRA-3C/MIT بوده و به زبان برنامه‌نویسی فرترن تدوین شده است. کاربرد این کد تحلیل ترموهیدرولیکی قلب رآکتورهای آب سبک در حالت پایا و گذرا است. هم‌چنین برای تحلیل پیش‌ران‌های هسته‌ای از نسخه‌های دیگر این کد می‌توان استفاده کرد. این کد مبتنی بر روش کانال جریان است و مهم‌ترین پارامترهای ترموهیدرولیکی در این کد دمای سیال خنک‌کننده، دمای میله‌ی سوخت و غلاف، شار حرارتی بحرانی، کیفیت بخار، افت فشار و نسبت انحراف از جوشش هسته‌ای هستند.

با توجه به کاربرد کد COBRA از طریق طیف وسیعی از کاربران، از دانشجویان و پژوهشگران کشورمان گرفته تا مؤسسات هسته‌ای و مرکز نظام ایمنی هسته‌ای برای مقاصد طراحی، ارزیابی و صحت‌سنجی محاسبات و با هدف کسب دانش و مهارت لازم در زمینه‌ی کد مذکور، توانایی تحلیل مسایل و کسب توانایی تجزیه و تحلیل خروجی کد و استخراج اطلاعات مورد نیاز از فایل خروجی، مؤلفین تصمیم به تدوین مجموعه‌ی حاضر گرفتند که اینک با نام COBRA-EN (مدل‌سازی، تحلیل و ارتقا کد)، پیش روی خوانندگان و پژوهشگران قرار گرفته است.

کتاب حاضر از پنج فصل تشکیل شده است. در فصل اول این کتاب به صورت مختصر به کدهای ترموهیدرولیکی اشاره می‌شود. در فصل دوم معادلات اساسی به‌کار رفته در کد و روند اجرای آن توضیح داده شده است. در فصل سوم نحوه‌ی تهیه‌ی فایل ورودی و استخراج داده‌های خروجی مطلوب از کد و در فصل چهارم به بررسی چند مسئله پرداخته شده است. در نهایت، در فصل پنجم نسخه‌ی اصلاح‌شده‌ای از این کد ارائه شده است. مطالب این کتاب به زبان ساده و قابل فهم تهیه و تنظیم شده است. اکثر مباحث این کتاب از دفترچه‌ی راهنمای کد COBRA-EN استخراج شده است و خواننده برای مطالعه‌ی بیشتر می‌تواند به راهنمای انگلیسی کد مراجعه کند. به همراه کتاب، سی دی محتوای فایل آموزشی کد، خود کد در نظر گرفته شده است. همچنین کوشش به عمل آمده است تا موضوع‌های کتاب تا حد امکان جنبه‌ی خودآموز داشته باشند. به همین منظور، با اضافه کردن مثال‌های مختلف در ضمن و پایان فصل‌ها سعی شده است تا خوانندگان، در یادگیری مطالب، درگیر و فعال باشند. برای درک سریع‌تر و بهتر مطالب این کتاب بهتر است فصل‌ها را به ترتیب مطالعه کنید، زیرا هر فصل به صورت مقدمه‌ای برای فصل بعدی است. همچنین در پایان هر فصل منابع مورد استفاده در تهیه‌ی مطالب آن فصل ذکر شده است که مراجعه به آن‌ها اطلاعات شما را در زمینه‌ی موضوع‌های مورد بحث در آن فصل گسترش خواهد داد.

از همه‌ی خوانندگان فرهیخته و ارجمند درخواست می‌شود با بیان نظرات و دیدگاه‌ها ما را مورد عنایت خود قرار داده و در ارتقا چاپ‌های بعدی کتاب یاری دهند.

با آرزوی توفیق
نعیم الدین متاجی کجوری
رحمان قراری
امیرحسین صفاری نوش آبادی

فصل اول: انواع کدهای ترموهیدرولیکی

کدهای معتبری از سال ۱۹۶۷ تاکنون در زمینه‌ی تحلیل ترموهیدرولیکی نیروگاه‌های هسته‌ای طی شرایط گذرا^۱ تدوین شده‌اند. معادلات اساسی ترموهیدرولیکی مورد استفاده در همه‌ی این کدها مشابه هستند. این کدها برای تحلیل جریان‌های تک فاز و دو فاز طراحی شده‌اند، اختلاط حرارتی و تبادل تکانه بین کانال‌ها در اثر جریان‌های عرضی و متلاطم در این کدها در نظر گرفته شده است، خواص کانال جریان نظیر سرعت محوری و چگالی به صورت میانگین آن‌ها در هر مقطع تعریف می‌شود. با این حال از برخی جنبه‌های دیگر با هم تفاوت‌هایی دارند که از تفاوت‌های بین این کدها می‌توان به معادلات تجربی جریان دوفازی و جریان‌های عرضی و متلاطم و روش‌های عددی استفاده‌شده در حل معادلات اشاره کرد. لازم به یادآوری است، این کدها ابتدا برای حالت پایا طراحی و با مرور زمان برای محاسبه‌ی هندسه‌های پیچیده‌تر و حالت گذرا تکمیل شده‌اند. هدف عمده از تلاش‌های پیوسته در توسعه‌ی این کدها بهبود قابلیت پیش‌بینی رفتار قلب راکتور و مدارهای ترموهیدرولیکی آن، افزایش سرعت تجزیه و تحلیل، دقت بررسی و مطالعه با جزئیات بیشتر است. با توجه به اهمیت موضوع جریان‌های دوفازی در برخی نیروگاه‌های هسته‌ای و در شرایط حادثه‌ای برای سایر نیروگاه‌ها، تولید مدل‌های جدید برای تحلیل هیدرودینامیکی و انتقال حرارت در جریان‌های دوفازی در این تلاش‌ها جایگاه مهمی دارد. از جمله کدهای ترموهیدرولیکی می‌توان به نسخه‌های مختلف کدهای ^۲RELAP، ^۳COBRA، ^۴WOSUB، ^۵TRAC، ^۶RETRAN، ^۷FLICA، ^۸MATRA، ^۹THERMIT، اشاره کرد. این کدها خصوصاً کدهای COBRA و RELAP در صنعت هسته‌ای به خوبی شناخته شده و به طور گسترده استفاده شده‌اند. کدهای WOSUB و RETRAN رفتار جدیدی در زمینه مدل‌سازی هیدرودینامیکی معرفی می‌کنند. کدهای TRAC و THERMIT هم به صورت گسترده در زمینه مدل‌سازی سه‌بعدی جریان‌های دوفازی غیرتعادلی به کار رفته‌اند.

۱. منظور از حالت گذار، حالت موقت عبور از یک حالت پایدار به حالت پایدار بعدی است در حالی که حالت گذرا، حالت موقتی است که لزوماً به یک حالت پایا منتهی نمی‌شود.

2. Reactor Excursion and Leak Analysis Program
3. Coolant Boiling in Rod Arrays
4. Multi-channel Analyser for steady states and Transient in Rod Arrays

۱-۱ طبقه‌بندی کدهای ترموهیدرولیکی

کدهای ترموهیدرولیکی را می‌توان بر اساس قابلیت تحلیل سیستم، مدل جریان دوفاز، نوع و دامنه‌ی کاربرد دسته‌بندی کرد که در ادامه این دسته‌بندی‌ها معرفی می‌شوند.

۱-۱-۱ کدهای با قابلیت تحلیل سیستم

منظور از تحلیل سیستم این است که کد قادر باشد قلب رآکتور و مدارهای ترموهیدرولیکی آن را شبیه‌سازی، تجزیه و تحلیل کند. کدهای این گروه به دو دسته کدهای تحلیل اجزا سیستم^۱ و کدهای تحلیل مدار^۲ تقسیم‌بندی می‌شوند. اساساً، کدهایی که رفتار کانال داغ^۳ (کانال داغ به کانالی اطلاق می‌شود که بیش‌ترین آنتالپی و توان را نسبت به دیگر کانال‌ها دارد) و میله‌ی سوخت را بررسی می‌کنند، کدهای تحلیل اجزا سیستم هستند. کدهای FLICA، COBRA، HAMBO، MATRA، THINC و THERMIT در این دسته جای می‌گیرند. کدهای مدار نیز کدهایی هستند که علاوه بر قلب رآکتور قابلیت تحلیل سایر اجزا مدار از جمله پمپ‌ها و مولدهای بخار را دارند. کدهای RELAP و ATHLET از نوع کدهای مداری است. در این کدها مدار اول و قلب رآکتور به یک‌سری حجم‌ها تقسیم‌بندی می‌شوند و معادلات جرم، تکانه و انرژی برای این حجم‌ها حل می‌شوند.

۱-۱-۱-۱ کدهای تحلیل اجزای سیستم

قبلاً گفته شد کدهایی که رفتار کانال داغ و میله‌های سوخت را در قلب رآکتور بررسی می‌کنند، کدهای تحلیل اجزای سیستم هستند. کدهای COBRA، WOSUB و THERMIT در این رده قرار می‌گیرند. نسخه‌های کدهای COBRA برای تحلیل حالت پایا از جمله COBRA-I، COBRA-II و COBRA-III امروزه منسوخ شده‌اند. کدهای COBRA-IIIC، COBRA-III و COBRA-III/MIT که از مدل تعادلی همگن دوفازی استفاده می‌کنند می‌توانند برای تحلیل حالات پایدار و ناپایدار استفاده شوند. انعطاف‌پذیری بالای کد COBRA-IIIC/MIT برای شبیه‌سازی قلب رآکتور و مجتمع‌های سوخت و کانال‌ها به صورت هم‌زمان، این کد را بسیار قابل استفاده کرده است و سرعت همگرایی بالایی دارد؛ اما این کد برای مدل‌سازی حالات گذرای با تغییرات بزرگ از جمله حادثه‌ی کاهش جریان خنک‌کننده مناسب نیست. نسخه‌ی دیگر کد COBRA، کد COBRA-IV-I است. در این کد مدل‌های فیزیکی واقعی‌تری نسبت به نسخه‌های قبلی در مدل‌سازی میله‌ی

-
1. Component code
 2. Loop code
 3. Hot channel

سوخت و مدل‌های انتقال حرارت به کار گرفته شده است. علی‌رغم مزیت‌ها، این کد محدودیت‌هایی نیز دارد، از جمله این‌که از روش تعادلی همگن به صورت گسترده استفاده می‌کند و زمان‌بر است. از نسخه‌های دیگر کد COBRA کدهای TF و DF هستند که از مدل تعادلی همگن استفاده می‌کنند. امروزه نسخه‌ی جدیدتری از کد COBRA با عنوان^۱ COBRA-SFS وارد عرصه شده است. این کد برای تحلیل ترموهیدرولیکی استخر نگره‌داری مجتمع‌های سوخت مصرف شده استفاده می‌شود. این کد تمام قابلیت‌های نسخه‌های قبلی را داشته و افزون بر آن قابلیت‌ها، تحلیل تابش دوبعدی و انتقال حرارت در سه بعد را نیز دارد. نسخه‌ی اولیه‌ی این کد در سال ۱۹۸۶، نسخه‌ی بعدی آن در سال ۱۹۸۹ و نسخه‌ی سوم آن در سال ۲۰۰۱ ارائه شد. این کد معادلات بقای تکانه، انرژی و جرم را به روش تفاضل محدود و با استفاده از روش نیوتن رافسون حل می‌کند. زمان اجرای برنامه در این کد بستگی به نوع مسئله‌ی ورودی دارد و می‌توان هر نوع هندسه‌ای را با این کد شبیه‌سازی کرد.

در برخی رآکتورها از جمله رآکتورهای آب جوشان چون با جریان دوفازی سروکار داریم برای تحلیل نیاز به کدهای دیگری وجود دارد تا بتوان از مدل‌های دوفازی بهره برد. یکی از این کدها، WOSUB است؛ اما این کد قابلیت تحلیل گذراهای خیلی سریع را ندارد. تحلیل شرایط جریان سیال یکی از نقاط مهم در گذراهای سریع است که با استفاده از معادلات فیزیکی دقیق‌تری باید ارزیابی شوند. یکی از این شرایط، جریان‌های دوفازی است. مدل دو سیالی روشی برای مدل‌سازی جریان‌های دوفازی است. این مدل در بسیاری از کدها از جمله کد تحلیل ترموهیدرولیکی THERMIT به کار گرفته شده است. کد THERMIT برای تحلیل ترموهیدرولیکی قلب رآکتور در سه بعد و شرایط غیرتعادلی و غیرهمگن است. مدل‌های مختلفی برای انتقال حرارت در این کد استفاده شده است تا کد بتواند محاسبات دمایی دقیق‌تری از میله‌ی سوخت و پارامترهای ترموهیدرولیکی داشته باشد. حادثه و گذراهای سریع را می‌توان با این کد مدل‌سازی کرد.

۱-۱-۲ کدهای تحلیل مدار

در قسمت‌های قبل ذکر شد کدهای مدار کدهایی هستند که علاوه بر قلب رآکتور قابلیت تحلیل سایر اجزای مدار از جمله پمپ‌ها، مولدهای بخار، فشارنده و غیره را دارند. کدهای RELAP، RETRAN، TRAC و ATHLET در این دسته جای می‌گیرند. سری کدهای RELAP از کد RELAPSE آغاز شد. نسخه‌های بعدی این کد RELAP2، RELAP3 و RELAP4 بودند.

1. Spent fuel storage

همه‌ی این کدها بر مبنای مدل تعادلی همگن در فرایند جریان دو فازی بنا نهاده شده‌اند. در سال ۱۹۷۶، توسعه‌ی کد RELAP4 برای مدل‌های غیرتعادلی و ناهمگن مورد بررسی قرار گرفت و توسعه‌دهندگان متوجه شدند که برای دستیابی به مدل‌های غیرتعادلی و ناهمگن لازم است کد کاملاً بازنویسی شود. نتیجه‌ی این تلاش‌ها منجر به پیدایش نسخه‌ی RELAP5 شد. این کد که پنجمین نسخه از مجموعه کدهای RELAP است، برای شبیه‌سازی رفتار سیستم‌های رآکتور آب سبک در گستره‌ی بسیار وسیعی از شرایط حوادث فرضی طراحی شده است. لازم به ذکر است که در نسخه‌های با شماره‌ی فرد، کد تقریباً به صورت کامل بازنویسی شده است، در حالی که نسخه‌های با شماره‌ی زوج، ساختار نسخه‌ی قبلی را دارد و فقط تغییراتی در مدل‌ها صورت گرفته است. کد محاسباتی RELAP5 یک کد گسترش‌یافته‌ی تجزیه و تحلیل رآکتور آب سبک بوده که در آزمایشگاه ملی آیداهو طراحی شده و قدرت پیش‌بینی رفتار نیروگاه‌های هسته‌ای را در شرایط عادی و حادثه دارد. برجسته‌ترین ویژگی در مجموعه‌ی RELAP5 استفاده از مدل‌های دوفازی، غیرتعادلی و ناهمگن برای شبیه‌سازی رفتار سیستم‌ها است. در نسخه‌ی RELAP5/MOD2 از مدل کامل غیرتعادلی دو سیالی با شش معادله (سه معادله‌ی جرم، انرژی و تکانه برای فاز بخار و سه معادله برای فاز مایع) استفاده شده است. در مجموع با ارتقا این کدها، دانش بیشتر، اطلاعات تفصیلی‌تری از شبیه‌سازی آزمایش‌های با مقیاس بزرگ و کوچک، تحقیقات نظری در جریان دوفازی، روش‌های حل عددی و نیز امکانات بیشتر برنامه‌ریزی با رایانه فراهم شده است. امروزه نسخه‌ای دیگر از این کد با عنوان RELAP7 منتشر شده است. از دیگر کدهای تحلیل مدار کدهای RETRAN و TRAC هستند که از مدل لغزش دینامیک^۱ (برای حل معادلات بقای جرم، انرژی و تکانه) برای بررسی حوادث مربوط به خنک‌کننده استفاده می‌شود با این تفاوت که دامنه‌ی کاربردی کد TRAC به علت روش حل متفاوت معادلات، نسبت به کد RETRAN وسیع‌تر بوده و قادر به تحلیل حوادث بیشتری در ارتباط با خنک‌کننده است. در کد RETRAN تحلیل در یک‌بعد صورت می‌گیرد و از مدل DSM و مدل‌های فیزیکی بهبود یافته استفاده می‌شود. کد TRAC نیز از مدل‌های فیزیکی واقعی‌تری برای محاسبات بهره می‌برد.

1. Dynamic slip model

۱-۲-۱ نوع مدل سازی جریان دوفاز

در این بخش مدل های ریاضی مورد استفاده در کدهای ترموهیدرولیکی برای محاسبه ی پارامترهای جریان دوفازی در قلب رآکتور و مدار اول را معرفی می کنیم. مدل تعادلی همگن، مدل تعادلی همگن بهبودیافته و مدل دو سیالی^۱ در این رده قرار دارند. در مدل تعادلی همگن^۲ فرض بر این است که جریان دوفازی به صورت جریان شبه تک فاز در نظر گرفته شود. این روش به صورت گسترده در تحلیل ترموهیدرولیکی به کار گرفته می شود. فرض همگن بودن نشان می دهد که سرعت و جهت دو فاز یکسان و توزیع جریان فازها یکنواخت است و فرض تعادلی دلیل بر دما و فشار یکسان در دو فاز است. باید توجه کنیم که کدهای شرایط پایای COBRA-I، COBRA-II، COBRA-III و COBRA-III هیچ مدلی برای تحلیل جریان عرضی اجباری ندارند. در کدهای COBRA-III، COBRA-II و COBRA-III شکل کاملی از حل معادلات تکانه به کار گرفته شده است. در نسخه های مختلف کد COBRA معادله ی انرژی با فرض اختلاط متلاطم^۳ و انتقال حرارت همرفتی به منزله ی سازوکار واحد برای تبادل انرژی داخلی، بسیار ساده شده است. در این مدل فرض شده است که در خود سیال هیچ گرمایی تولید نمی شود، تغییرات انرژی سینتیکی کوچک است و کاری در مقابل نیروی جاذبه انجام نمی شود.

روش تعادلی همگن در بررسی سیستم چندبعدی، غیرتعادلی و هم چنین تحلیل حوادثی از جمله کاهش جریان خنک کننده ناتوان است؛ چون در این جا با دو فاز سروکار داریم. مدل های دوفازی در کدهای ترموهیدرولیکی COBRA-TF، TRAC، KACHINA، SOLA-DF.FLX و THERMIT به کار رفته است. کد TRAC نوعی کد تحلیل مدار است. این کد از مدل سه بعدی برای محفظه ی تحت فشار رآکتور و برای سایر قسمت های مدار از مدل تک بعدی جریان استفاده می کند. این کد به دلیل استفاده از مختصات استوانه ای در تحلیل قلب رآکتور برای تحلیل رآکتورهای با چینش مجتمع های سوخت مربعی مناسب نیست. کد THERMIT نوعی دیگری از کدهای تحلیل مدار است. معادلات و روش های به کار رفته در کد TRAC در این کد نیز صادق است. در تحلیل قلب یا یک میله ی سوخت در این کد کل قلب یا میله به صورت یک گره در نظر گرفته می شود. کدهای SCDAP/RELAP، MELCOR، TRAC/MELPROG، VICTORIA، ATHLET، ICARE، IFCI، MAAP، CONTAIN

-
1. Two fluid model
 2. Homogenous equilibrium model
 3. Turbulent mixing

WAVCO و GOTHIC, SAMPSON, COCOSYS, IMPACT دیگر کدهای تحلیل مدار هستند. این کدها برای رآکتورهای آب سبک استفاده می‌شوند. محدوده‌ی کاربرد این کدها از محاسبات ترموهیدرولیکی حالت پایا تا حالات گذرا از جمله بررسی تولید و توزیع هیدروژن، توزیع ذرات معلق در هوا و احتراق هیدروژن است.

۳-۱-۱ محدوده‌ی کاربرد^۱

تقسیم‌بندی دیگری که برای کدها در نظر گرفته می‌شود بر اساس توانایی آن‌ها در بررسی حالات پایا، گذرا و تحلیل حوادث است. البته توجه داریم که قابلیت مدل‌سازی در هر کد به نوع معادلات ریاضی و روش‌های عددی مورد استفاده در حل معادلات در کد وابسته است. لذا کدها در سه دسته قابل طبقه‌بندی هستند: کدهای حالات پایا، گذرا و تحلیل حادثه.

۴-۱-۱ نوع کاربرد^۲

تقسیم‌بندی دیگر کدها بر اساس نوع کاربرد آن‌ها است. بر این اساس کدها به دو نوع مدل بهترین تخمین^۳ و ارزیابی مدل^۴ تقسیم می‌شوند. در مدل بهترین تخمین طیف وسیعی از پدیده‌ها و حوادث قابل ارزیابی هستند. در ارزیابی مدل نیز از فرضیات محافظه‌کارانه برای مدل‌های فیزیکی بهره گرفته می‌شود و طیف کوچکی از حادثه قابل ارزیابی است.

کدهای دیگری نیز وجود دارند که مبتنی بر روش دینامیک سیالات محاسباتی^۵ هستند. در این کدها، راهبرد حل مسئله، جایگزینی محیط پیوسته با یک محیط گسسته از طریق یک شبکه است. معادلات بقای جرم، تکانه و انرژی به صورت گسسته حل می‌شوند و خواص ترموهیدرولیکی برای هر نقطه از شبکه محاسبه می‌شوند. این روش برای هر هندسه پیچیده‌ای قابل استفاده است. نرم‌افزار Fluent یکی از معتبرترین نرم‌افزارهایی است که بر پایه‌ی روش دینامیک سیالات محاسباتی کار می‌کند و امروزه کاربرد زیادی دارد. این نرم‌افزار یکی از قدیمی‌ترین نرم‌افزارهای عمومی در زمینه‌ی دینامیک سیالات محاسباتی است که آرایه‌ی اولین نسخه‌ی آن، مربوط به سال ۱۹۸۳ و هم‌زمان با نرم‌افزار دیگری به نام Phoenix است. این نرم‌افزار در آغاز، با کاربردهای دانشگاهی و امکانات محدود آرایه شد؛ اما با گذر زمان و آرایه‌ی نسخه‌های جدید، به مدل‌ها و

-
1. Range of application
 2. Type of application
 3. Best estimate type
 4. Evaluation model type
 5. Computational fluid dynamics

قابلیت‌های آن اضافه شد و از نسخه‌های ۶ به بعد، امکان شبیه‌سازی بر روی شبکه‌های بدون سازمان^۱ (نامنظم) فراهم شد. در سال ۲۰۰۶، این نرم‌افزار توسط شرکت انسیس^۲ خریداری شد و پس از آن با نام تجاری Ansys FLUENT و به صورت بخشی از مجموعه نرم‌افزاری انسیس منتشر می‌شود. در حال حاضر، انسیس برنامه‌های توسعه بسیاری، برای FLUENT در نظر دارد و آخرین نسخه‌ی آن (Ansys FLUENT ۱۹) به تازگی ارائه شده است. با وجود توسعه و بهبود گسترده در نسخه‌های جدید، ساختار کلی و روش‌های شبیه‌سازی، مشابه نسخه‌های پیشین است و در اصول و روش تنظیم مدل و انجام شبیه‌سازی، تفاوت خاصی وجود ندارد. با این حال، در نرم‌افزارهای دینامیک سیالات محاسباتی با افزایش تعداد نقاط شبکه، زمان محاسبات افزایش می‌یابد.

۲-۱ خلاصه و جمع‌بندی مطالب فصل

در این فصل پیشینه‌ای از کدهای ترموهیدرولیکی بیان شد. هم‌چنین مشخص شد که این کدها بر اساس قابلیت تحلیل سیستم، نوع مدل جریان دو فاز، نوع و دامنه‌ی کاربرد دسته‌بندی می‌شوند. کدها بر اساس قابلیت تحلیل سیستم به دو دسته‌ی کدهای تحلیل اجزای سیستم و تحلیل مدار طبقه‌بندی می‌شوند. تقسیم‌بندی بر اساس نوع مدل جریان دو فاز در سه دسته‌ی تعادلی همگن، تعادلی همگن اصلاح‌شده و دو سیالی صورت می‌پذیرد. این کدها بر اساس دامنه‌ی کاربرد به کدهای حالات پایا، گذرا و تحلیل حادثه دسته‌بندی شده و نهایتاً بر اساس نوع کاربرد نیز به دو بخش کدهای بهترین تخمین و کدهای ارزیابی مدل تقسیم می‌شوند. کد COBRA-EN که در این کتاب مورد مطالعه قرار گرفته است از دسته کدهای تحلیل اجزای سیستم است. در جدول‌های ۱-۱، ۲-۱ و ۳-۱ خلاصه‌ای از مدل‌های استفاده‌شده در کدها و کاربردهای آن‌ها آورده شده است.

۱. منظور از شبکه‌بندی بدون سازمان در نمونه‌ی مورد مطالعه، مش‌بندی به صورت تصادفی در اندازه‌های مختلف و منظور از شبکه‌بندی سازمان‌یافته، مش‌بندی با یک اندازه و قالب مشخص است.

2. Ansys

جدول ۱-۱. خصوصیات و موارد کاربرد نسخه‌های کد RELAP.

RELAP2	PWR BWR	تحلیل مدار	RELAP3	PWR BWR	تحلیل مدار	RELAP3B	PWR BWR	تحلیل مدار	RELAP4	PWR BWR	تحلیل مدار	RELAP4MOD5	PWR	تحلیل مدار	RELAP4MOD6	PWR	تحلیل مدار و قلب	RELAP4MOD7	PWR BWR	تحلیل مدار	RELAP5	PWR BWR	تحلیل قلب و مدار	<p>روش عددی شبه ضمنی برای معادلات تکانه و جرم در دو فاز و معادله انرژی برای مخلوط دو فاز.</p> <p>روش عددی ضمنی که به صورت یک بعدی در حالت پایای تعدادی حل می‌شود.</p>	

جدول ۱-۲. کدهای ترموهیدرولیکی.

TRAC	MOXY	TODEE	RETRAN	THERMIT	WOSUB
PWR	BWR	PWR	PWR BWR	PWR BWR LMFBR	BWR
تحلیل مدار و حادثه شکست کوچک	تحلیل قلب و کانال داغ	تحلیل قلب و کانال داغ	تحلیل مدار	تحلیل قلب	تحلیل قلب
			یک بعدی به دو روش ضمنی و صریح	سه بعدی با مختصات کارترین	هندسه‌ی محوری و عرضی

جدول ۱-۳. خصوصیات و کاربرد نسخه‌های کد COBRA.

COBRA-EN	COBRA-TF	COBRA-DF	COBRA-IV-1	COBRA-IHP	COBRA-IHC	COBRA-III	COBRA-II	COBRA-I
PWR BWR	PWR BWR	PWR BWR	PWR BWR LMFBR	PWR BWR LMFBR	PWR BWR LMFBR	PWR BWR LMFBR	PWR BWR LMFBR	PWR BWR LMFBR
حالت پایا								
حالت پایا و گذرا								
معادلات بقای جرم، انرژی و تکانه‌ی دو فاز و جریان عرضی	حل معادلات بقای جرم، انرژی و تکانه در دوفاز							
مدل تعادلی و همگن و یک‌بعدی								

۳-۱ مراجع

1. M. Kazimi., M. Massoud: A Condensed Review of Nuclear Reactor Thermal-Hydraulic Computer Codes for Two-Phase Flow Analysis, Energy Laboratory Report No. 79-018 (1980).
 2. RELAP5/MOD 3.3 Code Manual: Modeling of Reactor Core and Vessel Behavior during Severe Accidents, NUREG, and CR-6150. Rev. 2.
 3. K.L. Davis: RELAP5/MOD3.1 Code Manual, Damage Progression Model Theory, Idaho National Engineering Laboratory (1995).
 4. Idaho National Laboratory: RELAP-7 Theory Manual (2014).
 5. COBRA-EN Code System for Thermal-Hydraulic Transient Analysis of Light Water Reactor Fuel Assemblies and Cores, Milano, Italy through the Nuclear Energy Agency Data Bank.
 6. S. Kliem, Y. Kozmenkov, T. Hohne, and U. Rohde: Analyses of the V1000CT-1 benchmark with the DYN3D/ATHLET and DYN3D/RELAP coupled code systems including a coolant mixing model validated against CFD calculations, Prog. Nucl. Energy, 48, 830-84 (2006).
 7. I. Toumi, A. Bergeron, D. Gallo, E. Royer, and D. Caruge: FLICA-4: a three- dimensional two-phase flow computer code with advanced numerical methods for nuclear applications, Nucl. Eng. Des. 139-55 (2000).
 8. Fluent 5 Users Guide, Fluent Inc., Lebanon (1998).
 9. COBRA-SFS CYCLE3, Thermal Hydraulic Analysis of Spent Fuel Casks, last modified (2001).
۱۰. احسان الله سعادتى، مصطفى زين العابدینى، اصول شبیه‌سازی مقدماتی و پیشرفته دینامیک سیالات محاسباتی با استفاده از نرم افزارهای FLUENT و CFX، چاپ اول (۱۳۹۴).
11. H. Joel, P. Milovan Ferziger: Computational methods for fluid dynamics (1999).
 12. J.J. Chattot: Computational aerodynamics and fluid dynamics: an introduction, Springer Science and Business Media (2004).
 13. M. Hashim, Y. Ming, A.S. Ahmed: Review of severe accident phenomena in LWR and related severe accident analysis codes, Res. J. App. Sci. Eng. Technol., 3320-35 (2013).

فصل دوم: آشنایی با کد ترموهیدرولیکی COBRA

قلب یک رآکتور هسته‌ای آب تحت فشار به گونه‌ای طراحی می‌شود که برداشت حرارت از قلب رآکتور، با حاشیه‌ی ایمنی بالایی صورت گرفته و از ایجاد جریان ناپایدار در قلب رآکتور جلوگیری شود. سیال خنک‌کننده، با عبور از قلب رآکتور حرارت تولیدشده در میله‌های سوخت را برداشت می‌کند. با عبور سیال از قلب رآکتور تغییراتی در ویژگی‌های سیال از جمله چگالی، دما، فشار و حجم بخار به وجود می‌آید. لذا باید همواره شرایط سیال خنک‌کننده هنگام عبور از قلب رآکتور را کنترل کرد. برای تحلیل تغییرات سیال خنک‌کننده در عبور از قلب رآکتور روش‌های گوناگونی وجود دارند؛ اما به دلیل اهمیت شرایط میله‌ی سوخت و شرایط جریان خنک‌کننده هم‌چنین به دلیل پیچیدگی مدل‌سازی جریان‌های دوفازی، مناسب‌ترین روش، استفاده از روش کانال جریان است. چون در این روش، مسیر جریان سیال به کانال‌های موازی تقسیم‌بندی می‌شود و معادلات بقای جرم، انرژی، تکانه و معادلات تجربی جریان‌های دو فاز و تک فاز، برای هر کانال نوشته شده و حل می‌شوند. تشخیص نوع رژیم جریان دوفازی بر پایه‌ی کسر بخار^۱ صورت می‌گیرد. رژیم‌های جریان بر پایه‌ی کسر بخار می‌توانند به رژیم‌های لختی، حبابی، توده‌ای، مه مانند و غیره تقسیم‌بندی شوند. به این ترتیب تبادل جرم، انرژی و تکانه بین کانال‌های جریان در نظر گرفته می‌شود. با توجه به هندسه‌ی پیچیده و گوناگونی پارامترها و طبیعت غیرخطی معادلات، حل تحلیلی هم‌زمان معادلات بقا و معادلات کمکی امکان‌پذیر نیست و از روش‌های عددی استفاده می‌شود. این معادلات و حل عددی آن‌ها در کدهای معتبر بین‌المللی مثل COBRA-EN، FLUCA موجود است و به جای نوشتن معادلات و حل عددی آن‌ها، از این کدها که اعتبار بین‌المللی دارند استفاده می‌شود.

۱-۲ کد ترموهیدرولیکی COBRA-EN

کد COBRA-EN مبتنی بر روش کانال جریان است که معادلات بقای جرم، انرژی، تکانه را همراه با معادلات کمکی (معادلات تولید بخار، لغزش و غیره) با سه روش حل می‌کند. روش اول (روش سه معادله‌ای همگن) معادلات جرم، انرژی و تکانه را برای مدل همگن جریان دوفازی به صورت هم‌زمان حل می‌کند. روش دوم (روش چهار معادله‌ای) مشابه روش اول است با این تفاوت که معادله‌ی بقای جرم بخار به معادلات فوق افزوده شده است و امکان محاسبه‌ی مستقیم کسر حجمی بخار را فراهم می‌سازد. در روش سوم نیز مثل روش چهار معادله‌ای، معادلات بقای جرم مایع و بخار به صورت

1. Void fraction

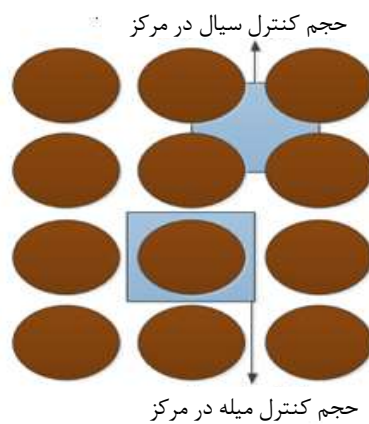
جداگانه، معادله‌ی بقای انرژی فقط برای مایع و معادله‌ی بقای تکانه برای مخلوط دوفاز به صورت هم‌زمان حل می‌شود. در کنار حل معادلات جرم، تکانه و انرژی، مدل حرارتی سوخت نیز به صورت عددی حل می‌شود. روش سوم برای رآکتورهای آب جوشان که در این نوع رآکتورهای هسته‌ای، هر مجتمع سوخت به وسیله‌ی یک جداره‌ی فلزی در امتداد محوری آن احاطه شده است، مناسب است.

پارامترهای مهم ورودی کد COBRA عبارت‌اند از: توزیع توان تولیدی ناشی از شکافت هسته‌ای، دما و دبی سیال ورودی، فشار سیال خروجی از قلب رآکتور، خواص فیزیکی حرارتی میله‌ی سوخت، مشخصات هندسی و نحوه‌ی چیدمان میله‌های سوخت در مجتمع سوخت و نحوه‌ی چیدمان مجتمع‌های سوخت در قلب رآکتور. هم‌چنین پارامترهای مهم خروجی این کد عبارت‌اند از: توزیع دمای سیال، چگالی سیال، دمای میله‌ی سوخت، ضریب انتقال حرارت، شار حرارتی بحرانی، کسر حجمی بخار، کیفیت بخار، افت فشار، نسبت شار حرارت بحرانی به محلی یا نسبت انحراف از جوشش هسته‌ای.

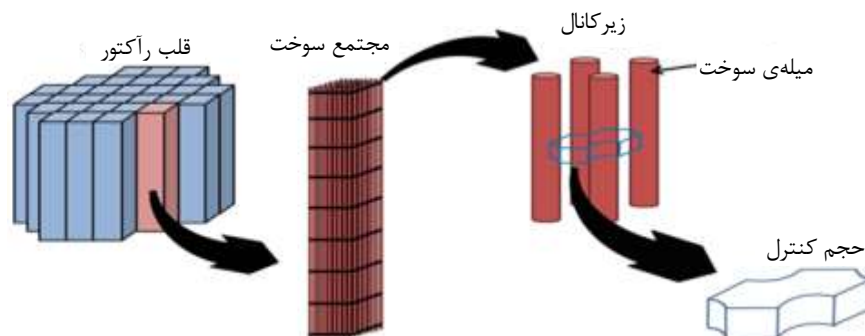
۱-۱-۲ روش کانال جریان

در رآکتورهای آب تحت فشار کانال‌های سیال خنک‌کننده با یک‌دیگر در راستای محوری و عرضی ارتباط دارند (جریان در مجتمع‌های سوخت با هم‌دیگر ارتباط عرضی دارند) و امکان مبادله‌ی جرم، تکانه و انرژی بین کانال‌ها وجود دارد. این پدیده باعث بهبود برداشت حرارت از قلب رآکتور می‌شود؛ اما محاسبات را پیچیده می‌کند. از سال ۱۹۶۰ تلاش زیادی برای تحلیل رفتار ترموهیدرولیکی سیال خنک‌کننده در مجتمع‌های سوخت انجام شده است. در این روش‌ها مسیر سیال خنک‌کننده به تعدادی کانال موازی تقسیم می‌شود که بین میله‌های سوخت قرار دارد. برای یافتن تغییرات آنتالپی و فشار و دبی جرمی کانال‌ها معادلات بقای جرم، انرژی و تکانه حل می‌شوند. به این روش تحلیل کانال جریان می‌گویند. در روش کانال جریان، معادلات بقا، با فرض جریان یک‌بعدی در جهت محوری به‌دست می‌آیند، بنابراین دقت این روش بستگی به مدل‌سازی نحوه‌ی تبادل جرمی با کانال‌های مجاور دارد (مانند: جریان‌های عرضی انحرافی و اختلاط متلاطم). مدل‌سازی تبادل عرضی جرم، تکانه و انرژی عبوری از سطح مشترک فرضی بین کانال‌ها مشخصه‌ی منحصر به فرد روش کانال جریان است. عواملی که در پارامترهای ترموهیدرولیکی بین کانال‌های مجاور دخالت دارند، جریان‌های عرضی انحرافی و اختلاط متلاطم هستند. عامل اول به خاطر وجود گرادیان فشار شعاعی ایجاد می‌شود و با انتقال جرم همراه است؛ ولی عامل دوم به فرایند اختلاط وابسته است و اگر جریان تک فاز باشد موجب انتقال جرم نمی‌شود. در روش کانال جریان دو گزینه برای انتخاب حجم کنترل وجود دارد، حجم کنترل سیال در مرکز و حجم کنترل میله‌ی سوخت در مرکز (شکل

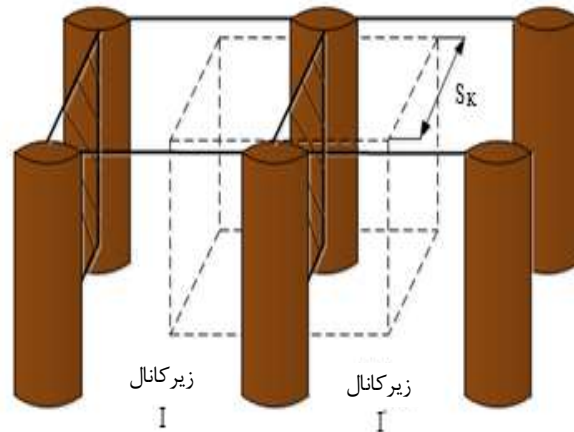
۱-۲). برای جریان تک فاز کانال جریان سیال در مرکز مناسب‌تر است، هرچند در جریان دوفازی به ویژه برای رژیم جریان حلقوی، تطبیق فیلم مایع (لایه‌ی نازکی از سیال بر روی دیواره‌ی میله‌ی سوخت) برای هر میله‌ی سوخت توسط روش سیال در مرکز مشکل است با وجود این در بیش‌تر کدها از این روش به علت دسترسی به یک دسته‌ی مشخص از معادلات کمکی، استفاده شده است. این حجم کنترل برای معادلات بقای جرم، انرژی و تکانه محوری مناسب است. پس با انتخاب روش سیال در مرکز، یک حجم کنترل مطابق شکل ۲-۲، که حجم سیال میان چهار میله سوخت است، در نظر گرفته می‌شود. در جهت محوری نیز تقسیم‌بندی با توجه به دقت مورد نیاز توسط کاربر انجام می‌شود. برای معادله‌ی تکانه‌ی عرضی باید حجم کنترل دیگری (شکل ۲-۳) اختیار کرد که نواحی مرزی دو کانال مجاور را دربر بگیرد.



شکل ۲-۱. نمایش حجم کنترل سیال در کانال و اطراف میله‌ی سوخت.



شکل ۲-۲. انتخاب حجم کنترل سیال در مرکز، در معادلات بقای جرم، انرژی و تکانه‌ی محوری.

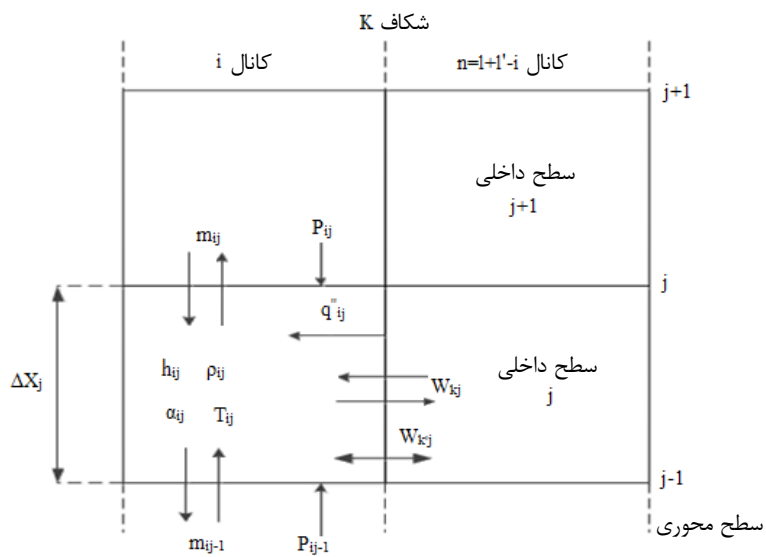


شکل ۲-۳. حجم کنترل برای معادله‌ی بقای تکانه‌ی عرضی.

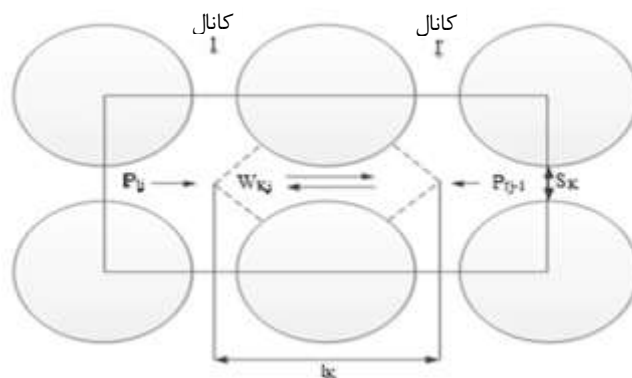
۲-۱-۲ فرم تفاضل محدود معادلات بقا

معمولاً در سری کدهای COBRA، تحلیل ترموهیدرولیکی برای کانال‌های موازی انجام می‌گیرد. جهت محوری (محور z) موازی با کانال‌ها و از طرف ورود جریان به سمت خروجی جریان سیال از قلب رآکتور در نظر گرفته می‌شود که معمولاً در قلب رآکتورهای آب سبک به صورت عمودی از پایین به بالا است. برای تقریب زدن معادلات دیفرانسیل جریان، کانال‌ها با استفاده از صفحات عمود بر z به بازه‌های محوری (نه لزوماً با طول یکسان) تقسیم می‌شوند. حجم‌های کنترل در راستای محوری از طریق صفحات عمود بر z و در جهت شعاعی با استفاده از سطوح جانبی کانال محدود شده‌اند و با حجم‌های کنترل همسایه در ارتباط هستند. هر حجم کنترل با یک شاخص کانال i و یک بازه‌ی محوری j مشخص می‌شود (شکل ۲-۴). قرارداد شده است که j شاخص مرز بالایی بازه محوری j نیز باشد، به طوری که سطوح محوری از یک تا J شماره‌گذاری شده است در حالی که بازه‌های محوری از ۲ تا J شماره‌گذاری می‌شوند. بازه‌ی محوری اول، فرضی بوده (حجم فرضی ورودی) و برای مقادیر جریان ورودی است. بازه محوری $1+j$ نیز فرضی بوده (حجم فرضی خروجی) و برای مقادیر ویژه شرایط مرزی خروجی قلب رآکتور است. با توجه به توضیحات بالا، برای خواص حجمی داخل حجم کنترل (آنتالپی h ، چگالی ρ ، دما T و کسر حجمی بخار α) و توان حرارتی ورودی به حجم کنترل از شاخص ij استفاده می‌شود. برای کمیت‌های مربوط به سطح (فشار P و دبی جرمی سیال m) در بالای حجم کنترل از شاخص ij و در پایین آن از شاخص $ij-1$ استفاده می‌شود. مقادیر فشار، جریان‌های محوری و عرضی و شار حرارتی سوخت بر روی سطوح میانگین در نظر گرفته می‌شوند در حالی که بقیه‌ی مقادیر از جمله آنتالپی سیال، کسر حجمی بخار، چگالی و

دما به صورت میانگین در هر حجم سلول محاسباتی در نظر گرفته می‌شوند. در تقریب معادلات جریان، جهت جریان عرضی بین دو کانال مجاور (شکل ۲-۵) فقط با جهت‌گیری فاصله بین دو کانال تعیین می‌شود و یک مختصات محلی باید برای هر فاصله بین دو کانال تعیین شود و جهت مثبت از طرف کانال مورد بررسی به طرف کانال مجاور است. اگر کانال مورد بررسی l و کانال همسایه l' باشد و فاصله‌ی بین دو کانال مجاور با k مشخص شود، خواهیم داشت:



شکل ۲-۴. حجم کنترل برای معادلات تفاضل محدود.



شکل ۲-۵. حجم کنترل برای معادلات تفاضل محدود برای حل معادله‌ی موازنه‌ی تکانه‌ی عرضی (دید از بالا).

$$i = l \rightarrow e_{ik} = 1$$

$$i = l' \rightarrow e_{ik} = -1$$

اگر s_k مقدار فاصله k باشد، یک طول l_k در جهت عمود بر فاصله k نیز باید در نظر گرفت. در کد COBRA-EN، نسبت s_k/l_k برای فشار جانبی، مستقل از فاصله k بوده و یک پارامتر ثابت است. مقادیر s_k و l_k برای هر کانال، در ورودی کد برای هر کانال تعیین می‌شوند. با توجه به شکل ۲-۴ جریان عرضی در فاصله k بین حجم کنترل‌های l_j و l'_j یعنی w_{kj} در تأثیر مقدار فشار P در سطح پایینی حجم کنترل‌های مربوطه ایجاد می‌شود و به همین دلیل فشار با شاخص $1-j$ نشان داده شده است.

هدف کد COBRA-3C تحلیل رفتار ترموهیدرولیکی یک دسته میله سوخت در رآکتورهای آب سبک بوده است که این ویژگی در کد COBRA-EN به اسم تحلیل زیرکانال^۱ نام‌گذاری شده است. روشن است که تحلیل کل قلب به روش زیرکانال، تقریباً برای کل قلب راکتور (که شامل ده هزار کانال و میله سوخت است) سخت و زمان‌بر است. بنابراین به دنبال کد COBRA-3C یک گزینه‌ی تحلیل قلب^۲ ایجاد شده است که در این روش هر مجتمع سوخت و سیال خنک‌کننده‌ی عبوری از آن به شکل یک کانال در نظر گرفته می‌شود. در این روش در ورودی کد باید مکان هر مجتمع سوخت را مشخص کرد و بدون در نظر گرفتن مکان هر میله سوخت، فقط تعداد میله‌های سوخت، محیط خیس شده و گرم‌شده در هر کانال را برای هر مجتمع سوخت تعریف کرد. در این روش محاسبات حرارتی فقط برای یک میله سوخت به منزله‌ی نماینده‌ی کل مجتمع سوخت انجام می‌شود و مقادیر پارامترهای مهم از جمله دبی سیال عبوری، محیط گرم‌شده و خیس‌شده و فاصله s_k به راحتی با معادلات هندسی ساده به دست می‌آیند.

در رآکتورهای آب سبک، بخشی از دبی عبوری از محفظه تحت فشار در برداشت حرارت نقشی ندارند. بنابراین مدل کردن چنین جریان‌هایی که حرارت را مستقیماً از میله سوخت دریافت نمی‌کنند با تعیین یک یا چند کانال کنارگذر^۳ امکان‌پذیر است. یادآوری می‌شود که روش سوم در حل معادلات برای رآکتورهای آب جوشان مناسب است. در ادامه معادلات اساسی مورد استفاده در کد COBRA بررسی می‌شوند. معادلات بقای جرم، انرژی و تکانه برای یک حجم کنترل با فرض

1. Sub channel analysis
2. Core analysis
3. Bypass channel

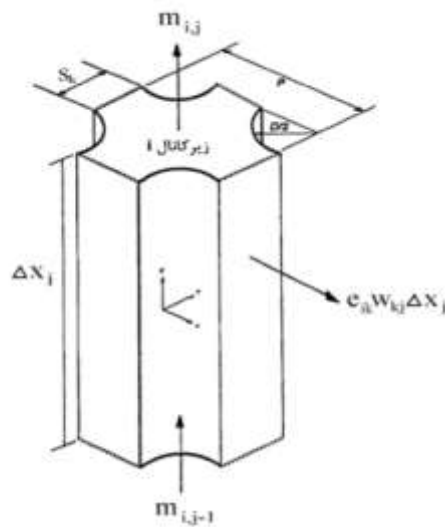
مدل همگن برای جریان دوفازی نوشته شده و معادلات تفاضل محدود فقط برای یک جزء مخلوط دو فاز توضیح داده می شوند.

۱-۲-۱-۲ معادله بقای جرم

فرم ساده شده معادله پیوستگی وابسته به زمان برای یک حجم کنترل به صورت زیر است:

$$A_i \frac{\Delta x_j}{\Delta t} (\rho_{ij} - \rho'_{ij}) + m_{ij} - m_{ij-1} + \Delta x_j \sum_{k \in i} e_{ik} w_{kj} = 0 \quad (1-2)$$

در شکل ۶-۲ تمام جرم های ورودی و خروجی برای حجم کنترل نمایش داده شده است. توجه شود که تبادل جرم در راستای عرضی فقط با یک کانال مجاور نشان داده شده است. اولین جمله در معادله (۱-۲) مربوط به انباشتگی جرم در حجم کنترل است، دومین جمله مربوط به جریان جرم ورودی و خروجی در جهت محوری بوده و سومین جمله مجموع جریان های عرضی ورودی و خروجی در جهت عرضی است.



شکل ۶-۲. نمایش جرم های ورودی و خروجی از یک کانال.

۲-۲-۱-۲ معادله بقای انرژی

فرم ساده شده معادله بقای انرژی وابسته به زمان برای یک حجم کنترل به صورت زیر است:

$$\frac{dE_{CV}}{dt} + \sum_{out} E - \sum_{in} E = 0$$

در شکل ۷-۲ تمام انرژی های ورودی و خروجی برای حجم کنترل نمایش داده شده است بنابراین فرم تفاضل محدود معادله بقای انرژی به صورت زیر نوشته می شود:

$$\begin{aligned} & \frac{A_i}{\Delta t} \left[\rho''_{ij} (h_{ij} - h_{ij}^n) + h_{ij} (\rho_{ij} - \rho_{ij}^n) \right] + \frac{1}{\Delta X_j} (m_{ij} h_{ij}^* - m_{ij-1} h_{ij-1}^*) \\ & + \sum_{k \in i} e_{ik} w_{kj} h_{kj}^* = \sum_{r \in i} P_r \Phi_{ir} q''_{rj} - \sum_{k \in i} w'_{kj} (h_{ij} - h_{nj}) - \\ & \sum_{k \in i} C_k s_k (T_{ij} - T_{nj}) + \sum_{r \in i} r_Q \Phi_{ir} q'_{rj} \end{aligned} \quad (2-2)$$

h_{ij}^* ، آنتالپی سیال جاری در سطح محوری j که به منزله‌ی آنتالپی سیال ورودی به حجم کنترل در جهت محوری است به طوری که:

$$m_{ij} > 0, \quad h_{kj}^* = h_{ij}$$

$$m_{ij} < 0, \quad h_{kj}^* = h_{ij+1}$$

h_{kj}^* آنتالپی سیال جاری برای شکاف k به عنوان آنتالپی ورودی به حجم کنترل است به طوری که:

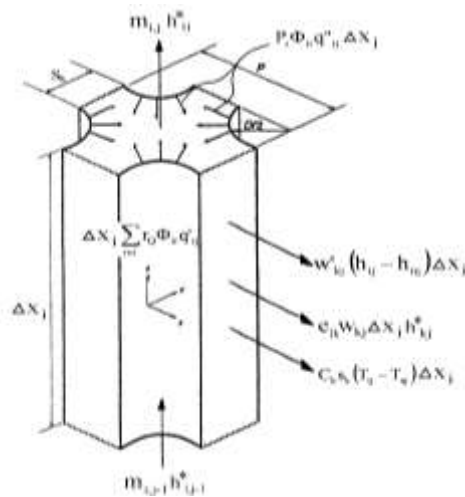
$$e_{ik} w_{kj} > 0, \quad h_{kj}^* = h_{ij}$$

$$e_{ik} w_{kj} < 0, \quad h_{kj}^* = h_{nj}$$

C_k مقدار هدایت حرارت در جهت عرضی است و با معادله‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$C_k = G_T \bar{k} / l_k \quad (3-2)$$

مقدار ضریب r_Q را می‌توان ثابت یا به صورت تابعی از متوسط جبری کسر حجمی بخار دور هر میله‌ی سوخت در نظر گرفت.



شکل ۲-۷. نمایش حجم کنترل برای معادله‌ی بقای انرژی.

معادله‌ی بین آنتالپی استاتیک (که از متوسط‌گیری جبری جمله‌ی مشتق نسبت به زمان به دست می‌آید) و آنتالپی سیال h که از متوسط‌گیری جبری روی جملات جریان انرژی به دست می‌آید، به صورت زیر است:

$$\frac{\partial(\rho''h)}{\partial t} = \rho'' \frac{\partial h}{\partial t} + h \frac{\partial \rho''}{\partial t} \quad (4-2)$$

و چگالی مؤثر برای انتقال آنتالپی با تابع تانگ^۱ تقریب زده می‌شود:

$$\rho'' = (\rho^n - h_{fg} \frac{\partial \psi}{\partial h})$$

$$\psi = \rho_f x (1 - \alpha) - \rho_g \alpha (1 - x) \quad (5-2)$$

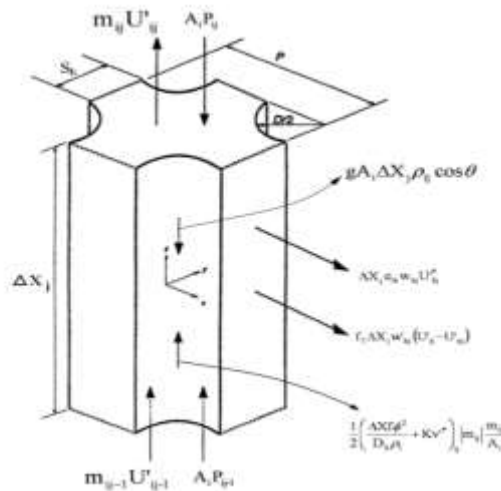
در سمت چپ معادله‌ی (۲-۲)، جمله‌ی اول مربوط به انباشتگی انرژی در حجم کنترل است، جمله‌ی دوم مربوط به آنتالپی ورودی به حجم کنترل و خروجی از آن در جهت محوری است و جمله‌ی سوم برابر مجموع آنتالپی ورودی و خروجی جریان‌های عرضی است. در طرف راست معادله‌ی (۲-۲)، جمله‌ی اول برابر مجموع شار حرارتی ناشی از میله‌های سوخت کانال i است. جمله‌ی های دوم و سوم برابر تبادل انرژی عرضی بین کانال i و کانال‌های همسایه‌ی n است که به ترتیب ناشی از تبادل گرمی متلاطم و هدایت حرارت سیال است. جمله‌ی آخر کسر توان ناشی از شکافت است که مستقیماً در سیال موجود در کانال i ظاهر می‌شود. با ضرب معادله‌ی پیوستگی (۱-۲) در آنتالپی جاری h_{ij} و کم کردن آن از معادله‌ی انرژی (۲-۲)، معادله‌ی جدیدی به دست می‌آید که به عنوان معادله‌ی انرژی در کد به کار گرفته می‌شود.

$$\frac{\Delta x_j}{\Delta t} A_i \rho_{ij}'' (h_{ij} - h_{ij}^n) + m_{ij} (h_{ij}^* - h_{ij}) - m_{ij-1} (h_{ij-1}^* - h_{ij}) + \Delta x_j \sum_{k \in i} e_{ik} w_{kj} (h_{kj}^* - h_{ij}) =$$

$$\Delta x_j \sum_{r \in i} p_r \Phi_{ir} q_{ij}'' - \Delta x_j \sum_{k \in i} w_{kj}' (h_{ij} - h_{nj}) - \Delta x_j \sum_{k \in i} C_k s_k (T_{ij} - T_{nj}) + \sum_{r \in i} r_q \Phi_{ir} q_{ij}' \quad (6-2)$$

۳-۲-۱-۲ معادله‌ی موازنه‌ی تکانه‌ی محوری

در شکل ۸-۲ تکانه‌های ورودی و خروجی و نیروهای سطحی و حجمی برای حجم کنترل نمایش داده شده است. فرم تفاضل محدود معادله‌ی بقای تکانه‌ی محوری به صورت زیر نوشته می‌شود:



شکل ۲-۸. نمایش حجم کنترل برای معادله‌ی بقای تکانه‌ی محوری.

$$\frac{\Delta x_j}{\Delta t} (m_{ij} - m_{ij}^n) + m_{ij} U'_{ij} - m_{ij-1} U'_{ij-1} = \Delta x_j \sum_{k \in i} e_{ik} w_{kj} U_{kj}^* = -g_c A_i (p_{ij} - p_{ij-1}) - g A_i \Delta x_j \rho_{ij} \cos \theta - \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta x f \phi^r}{D_h \rho_l} + kv^* \right)_{ij} \left| m_{ij} \right| \frac{m_{ij}}{A_i} - f_T \Delta x_j \sum_{k \in i} w_{kj} (U'_{ij} - U'_{nj})$$

در معادله‌ی فوق v' حجم مخصوص مؤثر بوده و برابر است با:

$$V' = \frac{x^r}{\alpha \rho_v} + \frac{(1-x)^r}{(1-\alpha) \rho_l} \quad (7-2)$$

$$U' = \frac{m}{A} v^* \quad (8-2)$$

بین دو کانال مجاور l و l' مقدار سرعت U' روی شکاف k که در طرف چپ معادله‌ی ۶-۲ ظاهر می‌شود، به صورت زیر تعیین می‌شود.

$$e_{ik} w_{kj} > 0 \rightarrow U_{kj}^* = U'_{ij}$$

$$e_{ik} w_{kj} < 0 \rightarrow U_{kj}^* = U'_{nj}$$

در سمت چپ معادله‌ی (۶-۲)، جمله‌ی اول مربوط به انباشتگی تکانه در حجم کنترل است، جمله‌های دوم و سوم برای تکانه‌ی ورودی و خروجی در جهت محوری است و جمله‌ی چهارم،

مجموع تکانه‌های ورودی و خروجی در جهت عرضی است. سمت راست معادله‌ی (۶-۲) مربوط به نیروهای وارده به حجم کنترل است که شامل نیروی ناشی از اختلاف فشار در جهت محوری، مؤلفه‌ی عمودی وزن سیال داخل حجم کنترل، افت فشارهای ناشی از اصطکاک دیواره و درگ^۱ (نیروی عقب‌راندگی یا پس‌کشی) و تبادل تکانه‌ی عرضی ناشی از اختلاط بین کانال i و کانال مجاور n (ترم آخر مشابه تبادل انرژی ناشی از تلاطم است؛ اما پارامتر کنترل‌کننده‌ی آن fT است که می‌توان از این جمله صرف‌نظر کرد) هستند.

۴-۲-۱-۲ معادله‌ی موازنه‌ی تکانه‌ی عرضی

با توجه به شکل ۵-۲ می‌توان معادله‌ی بقای تکانه‌ی عرضی را برای حجم کنترل به صورت زیر نوشت:

$$\frac{\Delta X}{\Delta t} (w_{kj} - w_{kj}^n) + \bar{U}_{C_{kj}} w_{kj}^* - \bar{U}_{C_{kj}} w_{kj-1}^* = \frac{s_k}{l_k} g \Delta X_j P_{kj-1} - \frac{1}{2} (K_G \frac{\Delta X V_C^*}{S_l})_{kj} |w_{kj}| w_{kj} \quad (۹-۲)$$

سرعت در مرز بین دو کانال (شکاف k) در معادله‌ی بالا برابر با متوسط سرعت‌های محوری در دو کانال مجاور l و l' در نظر گرفته می‌شود.

$$\bar{U}_{C_{kj}} = \frac{1}{2} (U_{C_{lj}} + U_{C_{l'j}}) \quad (۱۰-۲)$$

مقدار اختلاف فشار در دو طرف شکاف ($P_{kj-1} = P_{lj-1} - P_{l'j-1}$) در مقطع ورودی کانال‌ها در نظر گرفته می‌شود. شاخص $j-1$ نیز گواه این مطلب است. همچنین w_{kj}^* به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$w_{kj}^* = w_{kj} \rightarrow \bar{U}'_{kj} > 0$$

$$w_{kj}^* = w_{kj+1} \rightarrow \bar{U}'_{kj} < 0$$

در طرف راست معادله‌ی (۹-۲)، جمله‌ی اول نیروی ناشی از اختلاف فشار جانبی است و جمله‌ی دوم نیروی ناشی از افت فشار در جریان عرضی عبوری از شکاف است. در طرف چپ معادله‌ی فوق، جمله‌ی اول مربوط به انباشتگی تکانه در حجم کنترل و جمله‌های دوم و سوم تکانه‌ی ورودی و خروجی در جهت عرضی هستند.

1. Drag

۲-۲ روش‌های حل عددی

معادله‌ی بقای جرم (۱-۲)، معادله‌ی بقای انرژی (۲-۲) و معادلات بقای تکانه‌ی عرضی و محوری (۲-۶) و (۲-۹) به همراه تعدادی دیگری از معادلات جبری از جمله مدل کسر بخار که معادلات جریان دوفازی را تشکیل می‌دهند، برای متغیرهای پایه‌ی جریان (دبی جریان عرضی و محوری m_{ij} و w_{ij} ، فشار p_{ij} ، آنالپی h_{ij} و کسر حجمی بخار α_{ij}) در صدها یا هزاران سلول محاسباتی، باید حل شوند. بنابراین، عملکرد کلی حل معادلات به این صورت است که به گام‌های محاسباتی خطی که فقط شامل یک متغیر در یک زمان مشخص هستند، تبدیل می‌شوند و این محاسبات به دفعات تکرار می‌شوند تا یک همگرایی در جواب‌ها حاصل شود. به عبارت دیگر، از یک روش ضمنی^۱ استفاده می‌شود. با روش‌های ضمنی ناپایداری در زمان گذرا اتفاق نمی‌افتد؛ اما ممکن است مشکلات همگرایی در هر گام زمانی اتفاق بیفتد. در پاراگراف‌های بعدی عملکردهای حل معادلات جریان در هر تکرار را بیان خواهیم کرد.

اغلب لازم است که یک سیستم خطی با ماتریسی را حل کنیم که همه‌ی درایه‌های غیر صفر آن حول قطر اصلی قرار می‌گیرند. برای چنین سیستمی روش حذف پیشرو و جای‌گذاری پسرو گاوسی به کار رفته است. چون ماتریس‌ها اغلب قطری و یا نزدیک به قطری هستند، دیگر نیازی به محورگیری نیست. روش حذفی گاوس^۲ در زیر برنامه‌های DECAMP و SOLVE کدنویسی شده است. این زیربرنامه‌ها از بسته COBRA-3C گرفته شده‌اند. مهم‌ترین مزیت این روش کاهش زمان اجرای برنامه و اشغال فضای کم‌تری است. روش حل دستگاه ماتریس سه قطری نیز برای مسایل یک‌بعدی بوده و در زیر برنامه‌ی GAUSS قرار داده شده است.

۲-۲-۱ حل معادله‌ی انرژی

با حل معادله‌ی (۲-۵) برای h_{ij} و استفاده از توابع تغییر زیر:

-
1. Implicit
 2. Gauss

$$f_{ij} = \begin{cases} m_{ij} > 0 & \rightarrow 1 \\ m_{ij} \leq 0 & \rightarrow 0 \end{cases}$$

$$\beta_{ij} = \begin{cases} e_{ik} W_{kj} > 0 & \rightarrow 1 \\ e_{ik} W_{kj} \leq 0 & \rightarrow 0 \end{cases}$$

$$\beta'_{ij} = \begin{cases} W_{kj} > 0 & \rightarrow 1 \\ W_{kj} \leq 0 & \rightarrow 0 \end{cases}$$

به معادله‌ی زیر می‌رسیم:

$$\left\{ A_i \frac{\Delta x_j}{\Delta t} - (1 - f_{ij}) m_{ij} + f_{ij-1} m_{ij-1} + \Delta x_j \sum_{k \in i} [w'_{kj} - (1 - \beta_{kj}) e_{ik} w_{kj}] \right\} h_{ij}$$

$$- \Delta x_j \sum_{k \in i} [w'_{kj} - (1 - \beta_{kj}) e_{ik} w_{kj}] \times h_{nj} = A_i \frac{\Delta x_j}{\Delta t} \rho_{ij} h_{ij}^n - (1 - f_{ij}) m_{ij} h_{ij+1} \quad (11-2)$$

$$+ f_{ij-1} m_{ij-1} h_{ij-1} + \Delta x_j \sum_{r \in i} P_r \phi_{ir} q_{ij}'' + \Delta x_j \sum_{r \in i} r_Q \phi_{ir} q_{ij}' -$$

$$\Delta x_j \sum_{k \in i} C_k S_k (T_{ij} - T_{nj})$$

ماتریس ضرایب سیستم خطی معادله‌ی (۱۱-۲) ماتریس قطری است که پهنای باند آن برابر بیش‌ترین اختلاف بین هر جفت کانال مجاور است؛ یعنی اگر همه‌ی کانال‌ها با ردیف‌های افقی را متوالی چیده و شماره‌گذاری کنیم نصف پهنای ماتریس برابر با ماکزیمم عدد کانال‌ها در یک ردیف افقی است. در هر حجم کنترل، مشتق $\partial \psi / \partial h$ در تابع تانگ، به صورت عددی با محاسبه‌ی کیفیت و کسر بخار برای آنتالپی اصلاح شده ($|\Delta h| = 0.1$) توسط مدل کسر بخار انتخاب‌شده به صورت $\Delta \psi / \Delta h$ تخمین زده می‌شود. برای جریان‌های برگشتی محوری، معادله‌ی انرژی در هر تکرار خارجی دوبار محاسبه می‌شود (یک‌بار از پایین به بالا و بار دوم از بالا به پایین محور).

۲-۲-۲ روش حل گرادیان فشار

این روش اولین بار در کد VIPRE استفاده شد. این روش جایگزین روش حل ضمنی جریان عرضی شد که در نسخه‌های قبلی COBRA مورد استفاده قرار می‌گرفت که از گام‌های زیر تشکیل شده است:

- ابتدا آنتالپی خنک‌کننده از معادلات بقای انرژی برای حجم‌های کنترل محاسبه می‌شود.
- تغییر فشار محوری از ترکیب معادلات بقای تکانه‌ی عرضی و محوری محاسبه می‌شود.

• دبی جرمی در جهت عرضی با معلوم بودن گرادیان فشار محوری، از معادله‌ی بقای تکانه عرضی محاسبه می‌شود.

• دبی جرمی محوری از معادله‌ی بقای جرم محاسبه می‌شود.

• از روی آنتالپی هر سلول، کیفیت بخار، حجم بخار و چگالی خنک‌کننده حساب می‌شود.

در این روش معادله‌ی موازنه‌ی تکانه‌ی محوری (۶-۲) به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} & (\Delta x_j / \Delta t)(m_{ij} - m_{ij}^n) + (v' / A)_{ij} m_{ij}^v - (v' / A)_{(ij-1)} m_{(ij-1)}^v + \\ & \Delta x_j \sum_{k \in i} e_{ik} w_{kj} U'_{kj} = -g_c A_i (P_{ij} - P_{(ij-1)}) - g A_i \Delta x_j \rho_{ij} \cos \theta - \\ & \frac{1}{\gamma} [(\Delta x f \varphi^v) / (D_h \rho_l) + K v']_{ij} \times (m_{ij}^v) / A_i \quad (12-2) \\ & -f_T \Delta x_j \sum_{k \in i} w'_{kj} (U'_{ij} - U'_{nj}) \end{aligned}$$

از طرفی با توجه به معادلات زیر:

$$\begin{aligned} m_{ij} &= m_{ij-1} + (m_{ij} - m_{ij-1}) \\ m_{ij}^v &= m_{ij-1}^v + (m_{ij} - m_{ij-1})(m_{ij} + m_{ij-1}) \end{aligned}$$

و تعریف گرادیان فشار به صورت:

$$\left(\frac{dP}{dx} \right)_{ij} = \frac{P_{ij} - P_{ij-1}}{\Delta x_j} \quad (13-2)$$

و حذف اختلاف دبی محوری با کمک معادله‌ی بقای جرم (۱-۲)، به معادله‌ی زیر برای گرادیان فشار خواهیم رسید:

$$\begin{aligned} g_c \left(\frac{dP}{dx} \right)_{ij} &= -R_{ij} m_{ij-1}^v - g_c \rho_{ij} \cos \theta + \frac{m_{ij}^n - m_{ij-1}}{A_i \Delta t} \\ & - \frac{1}{A_i} \sum_{k \in i} [e_{ik} w_{kj} U'_{kj} + f_T w'_{kj} (U'_{ij} - U'_{nj})] \quad (14-2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + [\gamma U'_{ij} + \frac{\Delta x_j}{\Delta t} + R_{ij} A_i \Delta x_j] (m_{ij} + m_{ij-1}) [(\rho_{ij} - \rho_{ij}^n) / \Delta t + 1 / A_i \sum_{k \in i} e_{ik} w_{kj}] \\ R_{ij} &= \frac{I}{A_i} \left[\frac{1}{\gamma} \left(\frac{f j^v}{D_h r_l} + \frac{K v'}{\Delta x} \right) + \frac{v'_{ij} - v'_{ij-1}}{\Delta x_j} \right] \quad (15-2) \end{aligned}$$

جریان‌های عرضی با استفاده از معادله‌ی موازنه‌ی تکانه‌ی عرضی حذف می‌شوند. برای جریان محوری مثبت داریم:

$$\frac{\Delta x_j}{\Delta t} (w_{kj} - w_{kj}^n) + \overline{U'_{kj}} w_{kj} - \overline{U'_{kj-1}} w_{kj-1} = \frac{S_k}{l_k} g_c \Delta x_j p_{kj-1} - \frac{1}{2} \left(K_G \frac{\Delta x U'}{sl} \right)_{kj} |w_{kj}| w_{kj} \quad (16-2)$$

از طرفی با استفاده از معادله‌ی زیر برای اختلاف فشار عرضی:

$$P_{kj-1} = (P_l - P_{l'})_{j-1} = (P_l - P_{l'})_{j-1} - (P_l - P_{l'})_j + (P_l - P_{l'})_j \quad (17-2)$$

با ساده‌سازی و آرایش دوباره‌ی معادله‌ی (17-2) داریم:

$$(P_l - P_{l'})_{j-1} = (P_l - P_{l'})_j - (P_{lj} - P_{lj-1}) + (P_{lj} - P_{lj-1}) = (P_l - P_{l'})_j - \Delta x_j \left[\left(\frac{dP}{dx} \right)_{lj} - \left(\frac{dP}{dx} \right)_{lj-1} \right] \quad (18-2)$$

با حل معادله‌ی (16-2) و جایگزینی در معادله‌ی (14-2) یک سیستم خطی معادلات برای گرادیان فشار محوری (13-2) به دست می‌آید.

تغییرات فشار برای هر جفت کانال مجاور توسط معادله‌ی (18-2) ارزیابی می‌شود. سپس جریان‌های محوری و عرضی به ترتیب با حل معادلات تکانه‌ی عرضی (16-2) برای w_{kj} و حل معادله‌ی پیوستگی جرم برای m_{ij} اصلاح می‌شوند. تکرارهای خارجی، زمانی متوقف می‌شوند که برای هر کانال i و محور داخلی j داشته باشیم:

$$\left| \frac{m_{ij}^t - m_{ij}^{t-1}}{m_{ij}^{t-1}} \right| < \varepsilon_1 \quad (19-2)$$

که t شماره‌ی تکرار خارجی اخیر و ε_1 مقدار خطا است. هم‌چنین در کانال‌های باز، شرایط همگرایی زیر برای جریان عرضی باید برقرار باشد.

$$\frac{|w_{kj}^t - w_{kj}^{t-1}|}{\max \left[|w_{kj}^{t-1}|, \frac{5}{100} \times S_k \frac{|m_{lj-1}^{t-1} + m_{lj-1}^{t-1}|}{A_l + A_{l'}} \right]} < \varepsilon_2 \quad (20-2)$$

که ε_2 مقدار خطا، k شماره‌ی شکاف و j شماره‌ی محور داخلی است. همگرایی افت فشار نیز باید با معادله‌ی زیر بررسی شود:

$$\left| \frac{\Delta P_{\max}^t - \Delta P_{\min}^t}{\Delta P_{\max}^t} \right| < \varepsilon_1 \quad (21-2)$$

ΔP_{\max} و ΔP_{\min} به ترتیب افت فشار کمینه و بیشینه برای کانال مفروض در طول مسیر جریان است. بیشینه‌ی تغییرات نسبی افت فشار بین تکرارهای خارجی از معادله‌ی زیر حساب می‌شود:

$$\left| \frac{\Delta P_{ij}^t - \Delta P_{ij}^{t-1}}{\Delta P_{ij}^{t-1}} \right| < \varepsilon_1 \quad (22-2)$$

در هر بازه‌ای اگر به بیشینه تعداد تکرارها برسیم و در صورتی که سیستم همگرا نشود محاسبات متوقف می‌شوند. در نهایت، هر دو جریان محوری و عرضی در هر تکرار خارجی به صورت زیر میرا می‌شوند:

$$\hat{w}_{kj}^t = (1-d_1)w_{kj}^{t-1} + d_1 w_{kj}^t \hat{m}_{ij}^t = (1-d_2)m_{ij}^{t-1} + d_2 m_{ij}^t \quad (23-2)$$

که d_1 و d_2 فاکتورهای میراث‌وندگی کم‌تر یا مساوی یک هستند که توسط کاربر در کارت شماره‌ی ۲۷ وارد می‌شوند. به هر حال، در حالت پایا هیچ میراث‌وندگی وارد نمی‌شود مگر برای دبی جریان ورودی در حالتی که افت فشار یکنواخت برای همه‌ی کانال‌ها تنظیم شوند.

۳-۲-۲ روش نیوتن رافسون

یک روش حل جایگزین دیگر برای مسایل با جریان کم، جریان ساکن و مسایل با جریان بازگشتی (هم جریان مثبت و هم منفی) روش نیوتن است که در زیر به صورت خلاصه توضیح داده می‌شود.

- جریان‌های محوری و عرضی تخمینی اولیه و مشتقات آن‌ها نسبت به فشار به ترتیب از معادله‌ی تکانه‌ی محوری و عرضی محاسبه می‌شوند.
- تغییرات فشار که خطای پیوستگی جرم در حجم کنترل را به صفر می‌رساند با روش نیوتن رافسون تعیین می‌شوند.
- جریان‌های تخمینی اولیه با محاسبه‌ی مشتقات آن‌ها نسبت به فشار و محاسبه‌ی تغییرات فشار اصلاح می‌شوند.
- در هر تکرار خارجی روش نیوتن رافسون، یک سیستم معادلات خطی برای تغییرات فشار حل می‌شود. در هر تکرار داخلی، سیستم خطی ابتدا برای تمامی سطوح محوری در هر کانال محاسبه شده سپس برای همه‌ی سطوح عرضی حل می‌شود.

این روش می‌تواند نتایج واقعی‌تری در موارد مختلف ارائه دهد که سایر روش‌ها قادر به حل آن نیستند. در بسیاری از موارد، با در نظر گرفتن جریان برگشتی معادله‌ی تکانه محوری به صورت زیر می‌تواند نوشته شود:

$$[\Delta x_j / \Delta t + U'_{ij} + \Delta x_j \sum_{k \in i} (\beta_{kj} e_{ik} w_{kj} + f_T w'_{kj}) (v'^*) / A]_{ij} + K'_{ij} |U'_{ij}| m_{ij} - \Delta x_j \sum_{k \in i} [(1 - \beta_{kj}) e_{ik} w_{kj} - f_T w'_{kj}] U'_{nj} = (\Delta x_j / \Delta t) m_{ij}^n + U'_{(ij-1)} m_{(ij-1)} \quad (24-2)$$

$$-g_c A_i (P_{ij} - P_{ij-1}) - g \rho_{ij} \Delta x_j A_i \cos \theta$$

$$K'_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{f_j v_{ij} \Delta x}{D_h v'^*} + K \right)_{ij} \quad (25-2)$$

معادله‌ی موازنه‌ی تکانه‌ی محوری (۲-۹) می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$EC_{ij} = A_i \frac{\Delta x_j}{\Delta t} (r_{ij} - r_{ij}^n) + m_{ij} - m_{ij-1} + \Delta x_j \sum_{k \in i} e_{ik} w_{kj} \quad (26-2)$$

از معادله‌ی (۲-۱) خطای بقای جرم در هر سلول (i, j) به صورت زیر مشخص می‌شود:

$$\left[\frac{\Delta x_j}{\Delta t} + \overline{U'_{kj} b'_{kj}} - (1 - b'_{kj-1}) \overline{U'_{kj-1}} + \frac{\Delta x_j}{2 S_k l_k} K_G v'^*_{kj} |w_{kj}| \right] w_{kj} = \quad (27-2)$$

$$\frac{S_k}{l_k} g_c \Delta x_j p_{kj-1} + \frac{\Delta x_j}{\Delta t} w_{kj}^n - (1 - b'_{kj}) \overline{U'_{kj}} w_{kj+1} + b'_{kj-1} \overline{U'_{kj-1}} w_{kj-1}$$

برای کاهش خطا به سمت صفر، روش نیوتن رافسون در بازه‌های محوری $j-1$ ، $j-2$ و $j-1$ از کانال i و در سطح $j-1$ از سلول‌های مجاور برای همگرایی فشارها استفاده شده است.

$$-EC_{ij} = \frac{\partial EC_{ij}}{\partial p_{ij-2}} \delta p_{ij-2} + \frac{\partial EC_{ij}}{\partial p_{ij-1}} \delta p_{ij-1} + \frac{\partial EC_{ij}}{\partial p_{ij}} \delta p_{ij} + \sum_{k \in i} \frac{\partial EC_{ij}}{\partial p_{nj-1}} \delta p_{nj-1} \quad (28-2)$$

بر طبق معادله‌ی (۲۷-۲)، EC_{ij} می‌تواند با مشتق‌گیری جزئی از جریان‌های محوری در مرزهای سلول‌ها و با در نظر گرفتن ارتباط با فشار بیان شود. لذا داریم:

$$\begin{aligned} \frac{\partial EC_{ij}}{\partial p_{ij-2}} &= -\frac{\partial m_{ij-1}}{\partial P_{ij-2}} = \frac{\partial m_{ij-1}}{\partial P_{ij-1}} \\ \frac{\partial EC_{ij}}{\partial P_{ij-1}} &= -\frac{\partial m_{ij-1}}{\partial P_{ij-1}} + \frac{\partial m_{ij}}{\partial P_{ij-1}} + \Delta x_j \sum_{k \in i} e_{ik} \frac{\partial w_{kj}}{\partial P_{nj-1}} \\ &= -\frac{\partial m_{ij-1}}{\partial P_{ij-1}} - \frac{\partial m_{ij}}{\partial P_{ij}} + \Delta x_j \sum_{k \in i} \frac{\partial w_{kj}}{\partial P_{kj-1}} \end{aligned}$$

$$\frac{\partial EC_{ij}}{\partial P_{ij}} = \frac{\partial m_{ij}}{\partial P_{ij}}, \quad \frac{\partial EC_{ij}}{\partial P_{nj-1}} = -\Delta X_j \frac{\partial w_{kj}}{\partial P_{kj-1}} \quad (29-2)$$

که در این جا که $n = l + l' - i$ و $P_{lj-1} = P_{l'j-1} = P_{kj-1}$ اختلاف فشار بین کانال های l و l' هستند. مشتقات جزئی مورد نیاز جریان های محوری و عرضی به ترتیب از معادلات بقای تکانه ی محوری (۲۴-۲) و عرضی (۲۶-۲) بدست می آیند. بنابراین:

$$\frac{\partial m_{ij}}{\partial P_{ij}} = \frac{g_c A_i}{\frac{\Delta x_j}{\Delta t} + U'_{ij} + \Delta X_j \sum_{k \in i} (b_{kj} e_{ik} w_{kj} + C_T w'_{kj}) \left(\frac{v^*}{A} \right)_{ii} + K'_{ij} |U'_{ij}|} \quad (30-2)$$

$$\frac{\partial w_{kj}}{\partial P_{kj-1}} = \frac{\frac{s_k}{l_k} g_c \Delta x_j}{\frac{\Delta x_j}{\Delta t} + \beta'_{kj} \bar{U}'_{kj} - (1 - \beta'_{kj-1}) \bar{U}'_{kj-1} + \frac{\Delta x_j}{\gamma_{S_k} l_k} K_G v^*_{kj} |w_{kj}|} \quad (31-2)$$

حل معادلات فوق برای m_{ij} و w_{kj} با فرض ثابت نگه داشتن متغیرهای دیگر در تکرارهای بعدی انجام می پذیرد. جریان های گذرای محوری (m_{ij}) و عرضی (\tilde{w}_{ij}) اول محاسبه می شوند سپس روش نیوتن رافسون به کار گرفته می شود. در یک سیستم کانال بسته که جمع جریان های عرضی در معادلات بقای جرم در نظر گرفته نشده است، معادله ی (۲۸-۲) برای هر کانال i ، یک سیستم خطی با ماتریس ضرایب سه قطری است که از روش حذفی گاوس برای حل این سیستم استفاده می شود. در یک سیستم کانال باز (وجود ارتباط عرضی بین مجتمع های سوخت)، ارتباطی بین مسیرهای عرضی و محوری وجود دارد. بنابراین، تکرارهای داخلی روی تغییرات فشار انجام می شوند. ابتدا یک دستگاه معادلات خطی با ماتریس ضرایب سه قطری حل می شود. سپس، با استفاده از تغییرات فشاری محاسبه شده در محورهای مجاور ($j-2, j$)، تغییرات فشار در هر سطح محوری $1-j$ با استفاده از زیر برنامه ی مخصوص حل ماتریس ها با عرض مشخص^۱ حساب می شود. قبل از شروع محاسبه ی تغییرات فشار داخلی، ابتدا یک حدس اولیه برای تغییرات فشار بدون در نظر گرفتن جریان عرضی زده می شود. بنابراین، در هر سطح محوری، تغییرات فشار متوسط با استفاده از معادلات بقای جرم کلی به دست می آید و به عنوان حدس اولیه برای همه ی کانال ها به کار می رود. تکرار داخلی با معادله ی (۳۲-۲) برای کانال i و محور داخلی j ، پایان می یابد.

1. Banded matrix solver

$$\left| \frac{\delta P_{ij}^{(r,2)} - \delta P_{ij}^{(r,1)}}{P_{ij}^{r-1}} \right| < \varepsilon_3 \quad (32-2)$$

در معادله‌ی بالا ε_3 مقدار خطا و r شمارنده‌ی تکرار داخلی است. تعداد معینی برای تکرارهای داخلی باید تعیین شود. اگر تعداد تکرارها از بیش‌ترین مقدار تعیین‌شده فراتر رود برنامه پیامی صادر می‌کند که سطح همگرایی زیر $10\varepsilon_3$ نیست. در نهایت از تغییرات فشار محاسبه‌شده برای محاسبه‌ی فشارهای محلی و جریان‌ها بر طبق معادلات زیر استفاده می‌شود:

$$P_{ij} = P_{ij} + \delta p_{ij}, m_{ij} = m_{ij} + \frac{\partial w_{ij}}{\partial P_{ij}} (\delta p_{ij} - \delta p_{ij-1}) \quad (33-2)$$

$$w_{kj} = w_{kj} + \frac{\partial w_{kj}}{\partial P_{kj-1}} (\delta p_{ij} - \delta p_{ij-1}) \quad (34-2)$$

که \tilde{P}_{ij} فشار در پایان تکرار خارجی قبلی است. برای متوقف کردن تکرارهای خارجی، خطای بقای جرم از طریق معادله‌ی زیر بررسی می‌شود:

$$\frac{|E_{ij}^{(t)}|}{\max |m_{ij}^{(t)}|} < \varepsilon_4 \quad (35-2)$$

در معادله‌ی فوق ε_4 مقدار خطای تعیین شده توسط کاربرد است.

۲-۳ مدل کسر بخار بر اساس معادلات بقای جرمی بخار و معادلات لغزش

در مدل سه معادله‌ای همگن که در بخش‌های قبلی شرح داده شد، تولید کسر بخار در حالت زیر اشباع، با معادلات بخش ۳-۳ برای اصلاح کیفیت تعادلی بخار برای جوشش زیر اشباع حساب می‌شود. هم‌چنین، رانش^۱ بخار با معادلات کیفیت و لغزش بر اساس مدل‌های لغزش و رانش جریان، حساب می‌شود. روش دیگر برای بهبود مدل جریان اضافه کردن امکانی است تا بتواند کسر بخار را مستقیماً از معادله‌ی پیوستگی جرم بخار حساب کند. این امر مستلزم استفاده از مدل چهار معادله‌ای (معادلات بقای جرم مخلوط، انرژی، بردار تکانه و جرم بخار) است. برای معادله‌ی بقای جرم مخلوط داریم:

1. Drift

$$A \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \dot{m}}{\partial x} + \sum_{k \in i} e_{ik} w_k = 0 \quad (36-2)$$

معادله‌ی پیوستگی جرم بخار:

$$A \frac{\partial (\alpha_v \rho_v)}{\partial t} + \frac{\partial (A U_v \alpha_v \rho_v)}{\partial x} + \sum_{k \in i} s_k V_v (\alpha_v \rho_v) = \Gamma'_v \quad (37-2)$$

با گسسته‌سازی معادلات (36-2) و (37-2) در راستای زمان و مکان معادله‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$A_j \frac{\Delta x_j}{\Delta t} (\rho - \rho^n)_j + m_j - m_{j-1} + \sum_{k \in i} e_{ik} w_{kj} = 0 \quad (38-2)$$

برای جرم مخلوط:

$$A_j \frac{\Delta x_j}{\Delta t} (\alpha_v \rho_v - \alpha_v \rho_v^n)_j + A_j U_{vj} (\alpha_v \rho_v)_j^* - A_{j-1} U_{vj-1} (\alpha_v \rho_v)_{j-1}^* + \Delta x_j \sum_{k \in i} e_{ik} s_{kj} V_{vkj} (\alpha_v \rho_v)_{kj}^* = \Gamma'_v \Delta x_j = \Gamma_{vj} \quad (39-2)$$

در این معادله پارامتر n مقادیر را در بازه زمانی قبل نشان می‌دهند. همان‌طور که در بخش ۱-۲ اشاره شد، j هم یک سطح محوری و هم یک بازه محوری داخلی را نشان می‌دهد. یعنی حدود بخش محوری توسط سطح‌های محوری $j-1$ و j تعیین می‌شود. سرعت و دبی محوری و فشار به عنوان متغیرهای سطح محوری حساب می‌شوند. علامت * نشان‌دهنده‌ی آن است که مقدار پارامتر مفروض باید در هر سطح محوری زودتر از مقدار آن در محور داخلی، ارزیابی و تعیین شود؛ یعنی

$$Q_i^* = \begin{cases} U_{vi} > 0 \rightarrow Q_i \\ U_{vi} \leq 0 \rightarrow Q_{i+1} \end{cases}$$

$$Q_k^* = \begin{cases} e_{ik} w_k > 0 \rightarrow Q_{ii} \\ e_{ik} w_k \leq 0 \rightarrow Q_{ni} \end{cases}$$

برای کمیت کلی Q :

اگر n کانال متصل به کانال i با شکاف K باشد به طور کلی داریم: $n = l + l' - i$
 معادله‌ی بخار سه متغیر جدید را معرفی می‌کند: کسر بخار تولیدی α_v ، سرعت عرضی بخار و U_v سرعت محوری بخار. با در نظر گرفتن $s = U_v / U_l = V_v / V_l$ می‌تواند با دبی مخلوط ارتباط داشته باشند:

$$A_j U_{vj} = \frac{m_j}{\alpha_v \rho_{vj}^* + \left(\frac{\alpha_l \rho_l}{S}\right)_j^*}, S_{kj} V_{vkj} = \frac{w_{kj}}{\alpha_v \rho_{vkj}^* + \left(\frac{\alpha_l \rho_l}{S}\right)_{kj}^*} \quad (40-2)$$

با ترکیب این معادلات، معادله‌ی جرم بخار به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\Gamma_{vj} = \frac{(1-f_{j-1})m_{j-1}(\alpha_v \rho_v)_j}{(\alpha_v \rho_v)_j + (\alpha_l \rho_l / S)_j} + \Delta X_j \sum_{k \in i} (\beta_{kj} e_{ik} w_{kj}) \frac{(\alpha_v \rho_v)_j}{(\alpha_v \rho_v)_j + (\alpha_l \rho_l / S)_j} + \Delta X_j \sum_{k \in i} (\beta_{kj} e_{ik} w_{kj}) \frac{(\alpha_v \rho_v)_{nj}}{(\alpha_v \rho_v)_{nj} + (\alpha_l \rho_l / S)_{nj}} \quad (41-2)$$

در این معادله توابع f_j و β_{kj} توابع تبدیل هستند که در بخش ۲-۲-۱ شرح داده شده‌اند. مقادیر نسبت لغزش و میزان بخار تولیدی باید با معادلات مناسبی محاسبه شوند. ساده‌ترین فرض برای تعیین نسبت لغزش، تعادل دینامیکی بین فازها است که نسبت لغزش در این حالت یک است. لزوماً این امر دلیلی بر وجود تعادل حرارتی نیست. البته نسبت لغزش می‌تواند مقادیر ثابت غیر یک نیز داشته باشد و با معادلات مناسب دیگری نظیر بنکوف جونز^۱ به دست آید.

معادلات مختلفی برای محاسبه‌ی دبی بخار تولیدی Γ_v وجود دارد. معادله‌ای که عمدتاً در کد COBRA-EN به کار رفته است مدل اپری^۲ است که به صورت معادله‌ی تعادلی بین انتقال حرارت همرفتی، جوشش درهم و میعان، مدل شده است. در این جا تغییرات فازی ایجادشده در فصل مشترک مایع و بخار زمانی که دو فاز در حالت تعادل حرارتی نیستند در نظر گرفته نشده است.

همان‌طور که در بخش ۲-۲ اشاره شد، دو روش حل برای مدل ترموهیدرولیکی سه معادله‌ای، در کد COBRA-EN وجود دارد. بسط روش‌ها برای مدل چهار معادله‌ای ساده نیست؛ زیرا پایداری و همگرایی، به شیوه‌ی حل معادله‌ی بقای جرم بخار بستگی دارند. بنابراین در گام اول، معادله‌ی بقای جرم بخار ابتدا با روش نیوتن رافسون حل می‌شود. استفاده از روش نیوتن رافسون برای حل معادله‌ی بقای جرم مخلوط معادله‌ی زیر را ارایه می‌کند:

-
1. Bankoff Jones
 2. EPRI

$$A_j \frac{\Delta x_j}{\Delta t} = (\alpha_v \rho_v - \alpha_v^n \alpha_v^n)_j + \frac{f_j m_j (\alpha_v \rho_v)_j}{(\alpha_v \rho_v)_j + (\alpha_l \rho_l / S)_j} + \frac{(f_j) m_j (\alpha_v \rho_v)_{j+1}}{(\alpha_v \rho_v)_{j+1} + (\alpha_l \rho_l / S)_{j+1}} - \frac{f_{j-1} m_{j-1} (\alpha_v \rho_v)_{j-1}}{(\alpha_v \rho_v)_{j-1} + (\alpha_l \rho_l / S)_{j-1}} \quad (42-2)$$

$$\frac{\partial EC_m}{\partial \alpha_{vj}} = \begin{cases} A_j \frac{\Delta X_j}{\Delta t} (\rho_g - \rho_l) & \alpha_{vj} < 1 \\ 0 & \alpha_{vj} = 0, \alpha_{vj} = 1 \end{cases} \quad (43-2)$$

$$\frac{\partial EC_m}{\partial P_j} = \frac{\partial m_j}{\partial P_j}, \quad \frac{\partial EC_m}{\partial P_{nj-1}} = -\Delta X_j \frac{\partial w_{kj}}{\partial P_{kj-1}}$$

در مقایسه با روش نیوتن رافسون اعمال شده برای مدل سه معادله‌ای در بخش ۲-۲-۳ متوجه می‌شوید که ترم اضافی مشتق در ارتباط با میزان کسر بخار از ترم مشتق زمانی به دست می‌آید. معادله‌ی تکانه عرضی نشان می‌دهد که w_{kj} فقط به اختلاف فشار بین کانال‌های متصل با شکاف k به هم بستگی دارد. بنابراین:

$$A_j \frac{\Delta x_j}{\Delta t} (\rho - \rho^n)_j, \quad \rho = \alpha_v \rho_v + (1 - \alpha_v) \rho_l \quad (44-2)$$

$$e_{ik} \frac{\partial}{\partial P_{ij-1}} = \frac{\partial}{\partial P_{kj-1}}, \quad e_{ik} \frac{\partial}{\partial P_{nj-1}} = -e_{ik} \frac{\partial}{\partial P_{ij-1}} = \frac{\partial}{\partial P_{kj-1}}$$

برای حل نیوتن رافسون مدل سه معادله‌ای، مشتقات جزئی $\partial m_j / \partial P_j$ و $\partial w_{kj} / \partial P_{kj-1}$ هم‌چنین جریان‌های محوری و عرضی گذرا به ترتیب با معادلات تکانه‌ی محوری (۲-۲۴) و عرضی مخلوط (۲-۲۶) به دست می‌آیند. فرم تحلیلی مشتقات جریان نسبت به فشار محلی فقط با معادلات (۲-۳۰) و (۲-۳۱) ارایه می‌شوند. باید خطای پیوستگی معادله‌ی جرم بخار (EC_v) نیز وارد شود. این خطا به فشار محلی و کسر بخار بستگی دارد. بنابراین دو معادله‌ی جفت‌شده و دو متغیر δP_{ij} و $\delta \alpha_{vij}$ در هر گره به دست می‌آیند. به طور جزئی‌تر می‌توان نوشت:

$$EC_v = A_j \frac{\Delta x_j}{\Delta t} (\alpha_v \rho_v - \alpha_v^n \alpha_v^n)_j + f_j m_j Q_j + (1 - f_j) m_j Q_{j+1} - f_{j-1} m_{j-1} Q_{j-1} - \Gamma_{vj} - (1 - f_{j-1}) m_{j-1} Q_j + \Delta X_j \sum_{k \in i} (\beta_{kj} e_{ik} w_{kj} Q_j) + \Delta X_j \sum_{k \in i} (1 - \beta_{kj}) e_{ik} w_{kj} Q_{nj}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial EC_v}{\partial P_{j-1}} &= -f_{j-1} Q_{j-1} \frac{\partial m_{j-1}}{\partial P_{j-1}} + (1-f_{j-1}) Q_j \frac{\partial m_{j-1}}{\partial P_{j-1}} \\ \frac{\partial EC_v}{\partial \alpha_v} &= A_j \frac{\Delta X_j}{\Delta t} \rho_{vj} + \left[f_j m_j + (1-f_{j-1}) m_{j-1} + \Delta X_j \sum_{k \in I} \beta_{kj} e_{ik} w_{kj} \right] \frac{\partial Q_j}{\partial \alpha_{vj}} - \frac{\partial \Gamma_{vj}}{\partial \alpha_{vj}} \\ \frac{\partial EC_v}{\partial \alpha_{vj+1}} &= (1-f_j) m_j \frac{\partial Q_{j+1}}{\partial \alpha_{vj+1}}, \quad \frac{\partial EC_v}{\partial \alpha_{vjj}} = \Delta X_j (1-\beta_{kj}) e_{ik} w_{kj} \frac{\partial Q_{vj}}{\partial \alpha_{vjj}} \end{aligned} \quad (45-2)$$

$$Q_j = \frac{(\alpha_v \rho_v)_j}{(\alpha_v \rho_v)_j + (\alpha_l \rho_l / S)_j} \quad (46-2)$$

$$\frac{\partial Q_j}{\partial \alpha_{vj}} = \frac{\rho_{vj} \rho_{lj} \left(1 + \alpha_{vj} \alpha_{lj} \left(\frac{\partial S_j / S_j}{\partial \alpha_{vj}} \right) \right)}{S_j (\alpha_{vj} \rho_{vj} + \alpha_{lj} \rho_{lj} / S_j)^2} \quad (47-2)$$

در معادله‌ی (۴۶-۲)، Q_j کیفیت بخار است. برای نسبت لغزش ثابت، $\partial Q_j / \partial \alpha_{vj}$ صفر است. در صورتی که برای نسبت لغزش وابسته به کسر بخار، این مشتق جزئی به صورت عددی باید محاسبه شود. در هر تکرار خارجی روش نیوتن رافسون، در سیستمی متشکل از معادلات (۲-۴۲) و (۲-۴۵) تغییرات $\delta \alpha$ و δp محاسبه می‌شود. برای بررسی همگرایی $\delta \alpha$ از معادله‌ی (۲-۴۸) استفاده می‌شود.

$$\left| \delta \alpha_{ij}^{(r,2)} - \delta \alpha_{ij}^{(r,1)} \right| < 0.005 \quad (48-2)$$

که r شماره‌ی تکرار داخلی و تغییرات α در انتها به ترتیب با تغییرات سطح به سطح (مسیر ۲) و تغییرات کانال به کانال (مسیر ۱) مقایسه می‌شود. برای متوقف کردن تکرارهای خارجی، دبی‌های جریان‌های گذرا و افت فشارها بر طبق معادله‌های (۲-۱۹)، (۲-۲۰)، (۲-۲۱) و (۲-۲۲) هم‌چنین خطای پایستگی جرم مخلوط بر طبق معادله‌ی (۲-۳۵) برای همگرایی باید تست شوند.

در مدل چهار معادله‌ای، آنتالپی جریان‌ها از معادله‌ی انرژی مخلوط به دست می‌آید. طبق معادله‌ی تانگ:

$$\Psi_j = \alpha_v Q_j \rho_f + \alpha_v (1-Q_j) \rho_g \quad (49-2)$$

در تجربه، آنتالپی استاتیک با تعیین چگالی مؤثر برای آنتالپی انتقال از بین می‌رود و اگر نسبت لغزش یک باشد، آنتالپی استاتیک صفر است. مقدار $\partial \Psi_j / \partial h_j$ با شروع از یک مقدار کوچک و تغییرات دلخواه کسر بخار حساب می‌شود. سپس تغییرات متقابل در کیفیت بخار (Q) و تابع تانگ (Ψ) می‌تواند محاسبه شود. اگر نسبت لغزش به کسر بخار بستگی داشته باشد:

$$\Delta s_j = \partial s_j / \partial \alpha_{vj} \Delta \alpha_v$$

$$\frac{\partial \Psi_j}{\partial h_j} \cong \frac{1}{h_{fg}} \frac{\Delta \Psi_j}{\Delta Q} \quad (50-2)$$

$$Q_j = \frac{h_j - h_{lj}}{h_g - h_{lj}} \cong \frac{h_j - h_{lj}}{h_g - h_f} = \frac{h_j - h_{lj}}{h_{fg}} \quad (51-2)$$

آنتالپی مخلوط h_j ، آنتالپی مایع h_{lj} ، h_f آنتالپی مایع اشباع، h_g آنتالپی بخار اشباع و h_{fg} گرمای تبخیر است.

۲-۴ مدل ترموهیدرولیکی TWIGL

یک مدل دوفازی غیرهمگن است که بر پایه‌ی معادلات پیوستگی جرم برای دو فاز به صورت مجزا و معادله‌ی موازنه‌ی انرژی فقط برای فاز مایع است. اضافه بر این، از معادله‌ی لغزش بنکوف جونز استفاده می‌شود. این مدل برای کانال‌های بسته (رآکتور آب جوشان^۱) معتبر است. فقط مسیر محوری در نظر گرفته شده و مسیر عرضی لحاظ نشده است. این مدل درگیر حل معادلات به صورت هم‌زمان نمی‌شود. فقط محاسبات کسر بخار در هر گره نیازمند تکرارهای داخلی است که به کمک تکنیک محاسبه جانشینی انجام می‌شود. در مدل اصلی TWIGL محاسبات فشارها لحاظ نمی‌شود چون تأثیری در حل میدان‌های جریان ندارند. به هر حال چون در کد COBRA-EN افت فشار از ورودی قلب رآکتور تا خروجی قلب رآکتور می‌تواند تحت تأثیر تعدیل و تنظیم دبی جریان ورودی، یکنواخت شود و احتمالاً خصوصیات آب می‌تواند به منزله‌ی تابعی از فشار خروجی محاسبه شود، یک فرم ساده‌ای از معادله‌ی (۲-۱۴) بدون در نظر گرفتن گرادیان فشار حل می‌شود. مدل TWIGL شامل مدل حرارتی سوخت بر اساس یک فرمول‌بندی تحلیلی دماهای میانگین در قرص سوخت، شکاف و سطوح درونی و بیرونی غلاف است. این مدل به عنوان یک راه‌حل واقعی در کد COBRA-EN برای آزمایش و بررسی تغییر مدل جریان از سه معادله‌ای به چهار معادله‌ای است. در عمل این مدل، هم‌ارز روش نیوتن رافسون برای کانال‌های بسته است.

۲-۵ معادله‌ی موازنه‌ی جرم بور

بور موجود در خنک‌کننده مستقیماً بر دینامیک سیال اثر نمی‌گذارد چون از جرم آن در معادله‌ی موازنه‌ی جرم صرف‌نظر می‌شود. به هر حال، با معادله‌ی موازنه‌ی جرم بور قابلیت مدل‌سازی

1. Boiling water reactor

ترموهیدرولیکی برای دینامیک نوترون در رآکتورهای هسته‌ای را پیدا کرده است. تغییرات احتمالی غلظت بور در ورودی قلب می‌تواند باعث بروز حوادث گذرای شدیدی ناشی از تغییر راکتیویته شود. توزیع بور درون قلب رآکتور می‌تواند نقش مهمی ایفا کند. بنابراین معادله‌ی بقای جرم بور به فرم زیر است:

$$A_j \Delta x_j \frac{\partial}{\partial t} (\rho_{ij} c_{ij}) = m_{ij-1} r_{ij-1}^* c_{ij-1}^* - m_{ij} r_{ij}^* c_{ij}^* - \sum_{k \in i} (e_{ik} w_k)_j r_{kj}^* c_{kj}^* \quad (52-2)$$

$$r = \frac{\rho(1-x)}{\rho_l(1-\alpha)}$$

$$c_{kj}^* = \begin{cases} e_{ik} w_{kj} < \circ \rightarrow c_{nj} \\ e_{ik} w_{kj} > \circ \rightarrow c_{ij} \end{cases}, c_{ij}^* = \begin{cases} m_{ij} > \circ \rightarrow c_{ij} \\ m_{ij} < \circ \rightarrow c_{ij+1} \end{cases}$$

تابع تبدیل e_{ik} در بخش ۱-۲ معرفی شده است. i اندیس کانال، j اندیس سطح محوری و علامت * نشان‌دهنده‌ی مقادیر در سطح کانال هستند. با استفاده از تابع تبدیل‌های f_{ij} و β_{kj} که در بخش ۲-۲ مشخص شدند، فرم تفاضل محدود معادله‌ی (۵۲-۲) به صورت زیر در می‌آید:

$$A_j \Delta x_j \frac{\rho_{ij} c_{ij} - \rho_{ij}^n}{\Delta t} = f_{ij-1} m_{ij-1} r_{ij-1} c_{ij-1} + (1-f_{ij-1}) m_{ij-1} r_{ij} c_{ij} - (1-f_{ij}) m_{ij} r_{ij+1} c_{ij+1} - \sum_{k \in i} \beta_{kj} e_{ik} w_{kj} r_{ij} c_{ij} - \sum_{k \in i} (1-\beta_{kj}) e_{ik} w_{kj} r_{nj} c_{nj} \quad (53-2)$$

با حل این معادله پارامترهای r و m به دست می‌آیند. در شرایط مایع تک فاز یا مخلوط همگن مقدار r یک است. با حل معادله‌ی (۵۳-۲) برای c_{ij} :

$$\left[A_j \frac{\Delta x_j}{\Delta t} \rho_{ij} - (1-f_{ij-1}) m_{ij-1} r_{ij} + f_{ij} m_{ij} r_{ij} + r_{ij} \sum_{k \in i} \beta_{kj} e_{ik} w_{kj} \right] c_{ij} + \quad (54-2)$$

$$\sum_{k \in i} (1-\beta_{kj}) e_{ik} w_{kj} r_{nj} c_{nj} = A_j \Delta x_j \rho_{ij}^n c_{ij}^n + f_{ij-1} m_{ij-1} r_{ij-1} c_{ij-1} - (1-f_{ij}) m_{ij} r_{ij+1} c_{ij+1}$$

حل معادله‌ی (۵۴-۲) زمانی که همه‌ی جریان‌ها مثبت هستند نیاز به تکرار ندارد؛ اما در صورت وجود جریان برگشتی یا منفی، حلقه تکرار محاسبات در جهت محوری لازم است. شکل ۲-۹ را در نظر بگیرید که کانال i و محور داخلی j ، توسط سطوح j و $j-1$ احاطه شده است: در معادله‌ی بقای جرم بور، ترم‌های جابه‌جایی می‌توانند به صورت زیر نوشته شوند:

$$\hat{c}_{ij} = w_{ij} c_{ij} + (1-w_{ij}) c_{ij+1}, m_{ij-1} r_{ij-1}^* \hat{c}_{ij-1} = m_{ij} r_{ij} \hat{c}_{ij}$$

که m_{ij} دبی جرمی خنک‌کننده است که از فصل j عبور می‌کند و \hat{C}_{ij} غلظت بور در سطح j است. برای خنک‌کننده حاوی بور در لحظه $t=0$ ، می‌توان از تخمین زیر استفاده کرد:

در طرف راست معادله‌ی فوق، * نشان‌دهنده‌ی غلظت در سطح بالایی و ° نشان‌دهنده‌ی غلظت در سطح پایینی است؛ یعنی برای $m_{ij} > 0$

w_{ij} فاکتور تابع وزنی است. برای تخمین تابع وزنی w_{ij} از تابعی با عنوان $H_i(t)$ که نشان‌دهنده‌ی

$$\hat{C}_{ij} = w_{ij} c_{ij}^* + (1 - w_{ij}) c_{ij}^{\circ}$$

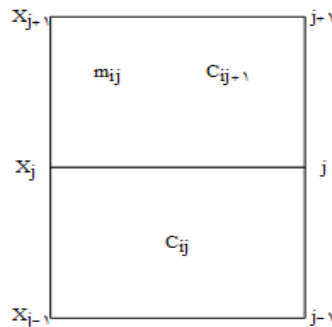
ارتفاع آب حاوی بور است، استفاده می‌شود. در نقطه‌ی شروع زمان، مقدار این تابع برابر با صفر

$$H_i(t) = H_i(t - \Delta t) + U_{ij} \Delta t$$

$$w_{ij} = \begin{cases} H_i \leq X_{j-1} \rightarrow 0 \\ H_i \geq X_j \rightarrow 1 \\ X_{j-1} < H_i < X_j \quad (0 \leq w_{ij} \leq 1) \rightarrow \frac{H_j - X_{j-1}}{X_j - X_{j-1}} \end{cases}$$

است، سپس در ادامه مقدار این تابع به صورت زیر اصلاح می‌شود:

با مشخص شدن فاکتور تابع وزنی برای سطح محوری j و مختصات X_j می‌تواند محاسبه شود. حالات گذرای مربوط به معادله‌ی موازنه بور در خنک‌کننده می‌تواند بر طبق نظر کاربر به بازه‌های زمانی مختلفی تقسیم‌بندی شود (کارت شماره‌ی ۳° در ورودی کد). در عمل می‌توان زمان کمینه را با معلوم بودن داده‌های مانند سرعت جرمی خنک‌کننده در ورودی قلب محاسبه کرد.



شکل ۲-۹. المان انتخابی برای معادله‌ی بقای جرم بور.

۲-۶ مدل‌های تشکیل دهنده‌ی جریان دو فازی

معادلاتی که در این قسمت ارائه خواهد شد برای محاسبه‌ی پارامترهایی نظیر آنتالپی یا دما، فشار، دبی جرمی، کیفیت جریان و میزان تولید بخار برای جریان‌های دوفازی است. مدل‌های اختلاط درهم^۱، یعنی معادلاتی که برای جریان‌های عرضی آشفته در معادلات موازنه‌ی انرژی و تکانه‌ی محوری ظاهر می‌شوند، مستقیماً در کارت ۱۴ و ۱۶ وارد می‌شوند.

۲-۶-۱ معادلات افت فشار تک‌فاز

در جریان‌های تک‌فاز افت فشار ناشی از اصطکاک دیواره با معادله‌ی زیر ارائه می‌شود:

$$\frac{dP}{dx} = \frac{fG^2 v'}{2D_h g_c} \quad (۵۵-۲)$$

که در این معادله، g_c فاکتور تبدیل و برابر ۳۲٫۲ است.

فاکتور اصطکاک دیواره به صورت $f = aRe^b + c$ و $Re = \frac{GD_h}{\mu_{bulk}}$ است. ضرایب a ، b و c برای جریان‌های آرام و درهم به صورت پیش‌فرض زیر هستند:

$$b = -۰٫۲۵, a = ۰٫۳۲, c = ۰٫۰۰۱$$

فاکتور اصطکاک واقعی به عنوان بیشینه مقادیر فاکتور اصطکاک جریان آرام و درهم فرض می‌شود. فاکتور اصطکاک بر اساس خواص توده‌ی سیال خنک‌کننده حساب می‌شود. معادلات روشنو^۲ و کلارک^۳ برای ویسکوزیته‌ی سیال نزدیک دیواره‌ی گرم به صورت زیر است:

$$\frac{f}{f_{iso}} = 1 + \frac{P_h}{P_w} \left[\left(\frac{\mu_{wall}}{\mu_{bulk}} \right)^{۰٫۶} - 1 \right] \quad (۵۶-۲)$$

دمای دیواره از معادله‌ی (۵۷-۲) تخمین زده می‌شود:

$$T_{wall} = T_{bulk} + \frac{q'}{P_h H_{spfc}} \quad (۵۷-۲)$$

H_{spfc} ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی تک‌فاز است. در ادامه افت فشار ناشی از عبور جریان از شبکه‌های محافظ از معادله‌ی زیر قابل محاسبه است:

1. Turbulent mixing
1. Rohsenow
2. Clark

$$\Delta P = k_D \frac{V'G^r}{\tau g_c} \quad (58-2)$$

در معادله‌ی بالا k_D ضریب اتلاف به خاطر نیروهای تنشی است که به صورت تابعی از مکان محوری برای هر نوع کانال در ورودی کد داده می‌شود. افت فشار در جریان‌های عرضی بین مرزهای کانال به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\Delta P = k_G \frac{V'W |W|}{\tau S^r g_c} \quad (59-2)$$

در معادله‌ی بالا، پارامتر (S) نشان‌دهنده‌ی پهنای شکاف است.

۲-۶-۲ ضریب اصطکاک دو فازی

این ضریب به صورت نسبت افت فشار در دو فاز به افت فشار در حالتی تعریف می‌شود که کل سیال، مایع فرض شود. معادلاتی برای محاسبه‌ی این ضریب وجود دارند: مدل همگن، معادله‌ی آرماند^۱، اپری (پیش فرض کد)، معادله‌ی چندجمله‌ای بر حسب کیفیت تا درجه ششم.

مدل همگن:

$$\phi^r = \frac{\rho_l}{\rho_m} \left[\frac{\mu_f}{x\mu_g + (1-x)\mu_f} \right]^b \quad (60-2)$$

مدل آرماند:

$$\phi^r = \begin{cases} \frac{(1-x)^r}{(1-\alpha)^{1.42r}} & \rightarrow 0 < \alpha < 0.6 \\ \frac{0.478(1-x)^r}{(1-\alpha)^{2.72r}} & \rightarrow 0.6 < \alpha < 0.9 \\ \frac{1.73(1-x)^r}{(1-\alpha)^{1.64r}} & \rightarrow 0.9 < \alpha < 1 \end{cases} \quad (61-2)$$

3. Armand

مدل اپری:

$$C_f = 0.357x^{-0.175}(0.36G)^{-0.45}, \quad p \geq 600 \text{ psia}$$

$$\varphi^r = 1.0 + \left[\frac{V_g}{V_f} - 1 \right] x C_f \quad (62-2)$$

$$C_f = 0.357x^{-0.175}(0.36G)^{-0.45} \left(1 + 1.0 \frac{p}{p_c} \right), \quad p < 600 \text{ psia}$$

X کیفیت بخار، V_g حجم ویژه بخار اشباع، V_f حجم ویژه مایع اشباع، p_c فشار بحرانی است. معادله‌ی (۶۲-۲) بر اساس واحدهای انگلیسی است.

۲-۶-۳ مدل‌های جوشش زیر اشباع

در سیال خنک‌کننده که دو فاز مایع و بخار در حالت تعادل ترمودینامیکی هستند، کیفیت بخار از معادله‌ی زیر قابل محاسبه است:

$$x_e = \frac{h - h_f}{h_g - h_f} \quad (63-2)$$

برای جوشش محلی نزدیک یک سطح داغ، کیفیت بخار تعیین می‌شود. مدل لوی^۱ به صورت زیر است:

$$x = \begin{cases} x_e - x_d e^{\left(\frac{x_e - 1}{x_d}\right)} & \rightarrow x_e \geq x_d \\ 0 & \rightarrow x_e < x_d \end{cases} \quad (64-2)$$

در $x_d = -\frac{c_{pf}\Delta T_d}{h_{fg}}$ کیفیت تعادلی در نقطه‌ی از بین رفتن حباب است و ΔT_d درجه‌ی زیر اشباعیت در نقطه‌ی از بین رفتن حباب^۲ است. معادلات زیر برای محاسبه‌ی ΔT_d استفاده می‌شود:

1. Levy
2. Bubble departure point

$$\Delta T_d = \begin{cases} \frac{q'}{P_h H_f} & \rightarrow Y_B^+ < \circ \\ \frac{q'}{P_h H_f} - QPr Y_B^+ & \rightarrow \circ \leq Y_B^+ \leq \Delta \\ \frac{q'}{P_h H_f} - \Delta Q \left\{ Pr + \ln \left[1 + Pr \left(\frac{Y_B^+}{\Delta} - 1 \right) \right] \right\} & \rightarrow \Delta < Y_B^+ < \Delta \circ \\ \frac{q'}{P_h H_f} - \Delta Q \left\{ Pr + \ln [1 + \Delta Pr] + \circ \Delta \ln \left(\frac{Y_B^+}{\Delta \circ} \right) \right\} & \rightarrow Y_B^+ \geq \Delta \circ \end{cases} \quad (65-2)$$

در معادلات فوق، H_f ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی (دیتوس بولتر^۱) است. برای رسیدن به کیفیت دقیق‌تر، از معادله‌ی اپری که از توابع هیپربولیک به جای تابع نمایی استفاده می‌کند، می‌توان استفاده کرد:

$$x = \begin{cases} \frac{x_e - x_d \left[1 - \tanh \left(1 - \frac{x_e}{x_d} \right) \right]}{1 - x_d \left[1 - \tanh \left(1 - \frac{x_e}{x_d} \right) \right]} & \rightarrow x_e \geq x_d \\ \circ & \rightarrow x_e < x_d \end{cases} \quad (66-2)$$

از طرفی داریم:

$$x_d = -\frac{Cp_l Z}{h_{fg}} \quad (67-2)$$

که Cp_l ظرفیت گرمایی ویژه مایع زیر اشباع است و واحد آن $\frac{\text{Btu}}{\text{lb}_m \cdot ^\circ\text{F}}$ و Z یک تابع تجربی است که به صورت زیر تعیین می‌شود:

$$Z = \frac{B - \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}$$

A ، B و C نیز به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

3. Dittus boelter

$$A = \psi C_B (H_{DB} + H_{HN})^\psi$$

$$B = \psi H_{DB}^\psi \left(H_{HN} + \frac{1}{\psi} H_{DB} \right) + \lambda q^\psi C_B (H_{DB} + H_{HN}) \quad (68-2)$$

$$C = \psi C_B q^{\psi\lambda} + q^\psi H_{DB}^\psi$$

در معادله‌ی بالا Z مقداری مثبت است.

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری فاز مایع، معادله‌ی دیتوس بولتر:

$$H_{DB} = \frac{0.023 Re_j^{0.8} Pr_j^{0.4} K_f}{D_h} \quad (69-2)$$

ضریب انتقال حرارت میعان، معادله‌ی هانکوکس نیکول:

$$H_{HN} = \frac{0.023 Re_j^{0.62} Pr_j K_f}{D_h} \quad (70-2)$$

ضریب وابستگی فشار برای شار حرارتی جوشش هسته‌ای توسط معادله‌ی تام:

$$C_B = 0.05358 e^{\frac{P}{630}} \quad (71-2)$$

۴-۶-۲ معادلات کسر و کیفیت بخار

زمانی که مقدار کیفیت بخار تخمین زده می‌شود، یک مدل کسر بخار باید برای محاسبه جز حجمی بخار و لغزش به کار گرفته شود. زمانی که هیچ لغزشی بین فازهای مایع و بخار نباشد، کسر بخار به راحتی قابل محاسبه است:

$$\alpha = \frac{xv_g}{(1-x)v_f + xv_g} \quad (72-2)$$

اگر لغزش لحاظ شود، معادله‌ی زیر را داریم:

$$\alpha = \frac{xv_g}{(1-x)sv_f + xv_g} \quad (73-2)$$

که در این معادله، مقدار لغزش (s) می‌تواند با چند جمله‌ای اسمیت^۳ محاسبه شود:

1. Hancox nicoll
2. Thom
1. Smith

$$s = 0.4 + 0.6 \left[\frac{0.4 + x \left(\frac{V_g}{V_f} - 0.4 \right)}{0.4 + 0.6x} \right]^{0.5} \quad (74-2)$$

سه معادله‌ی دیگر برای محاسبه‌ی کسر بخار وجود دارند که در کد COBRA-EN استفاده می‌شوند که عبارت‌اند از:
معادله‌ی آرماند مسنا^۱:

$$\alpha = x V_g \frac{0.833 + 0.167x}{(1-x)V_f + xV_g} \quad (75-2)$$

معادله‌ی زوبر فیندالی^۲:

که با معادله‌ی جوشش زیر اشباع لوی^۳ ترکیب می‌شود:

$$\alpha = \frac{x}{1.13 \left[x + \frac{\rho_g}{\rho_f} (1-x) \right] + \frac{\rho_g V_{gj}}{G}} \quad (76-2)$$

سرعت رانشی V_{gj} (سرعت نسبی فاز بخار به سرعت متوسط مخلوط دو فاز) از معادله‌ی زیر قابل محاسبه است:

$$V_{gj} = 1.18 \left[\frac{\sigma g g_c (\rho_f - \rho_g)}{\rho_f^2} \right]^{0.25} \quad (77-2)$$

معادله‌ی اپری:

به عنوان معادله‌ی جوشش زیر اشباع گسترش یافت، به نظر می‌رسد که مشابه فرم معادله‌ی زوبر فیندالی باشد.

2. Armand messena
3. Zuber findaly
4. Levy

$$\alpha = \frac{x}{C_o \left[x + \frac{\rho_g}{\rho_f} (1-x) \right] + \frac{\rho_g V_{gj}}{G}} \quad (78-2)$$

اما سرعت رانشی V_{gj} از معادله‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$V_{gj} = 1/4 \left[\frac{\sigma g g_c (\rho_f - \rho_g)}{\rho_f} \right]^{1/2} \frac{(1-\alpha)^{0.5}}{1+\alpha} \cos \theta \quad (79-2)$$

که θ زاویه‌ی انحراف دسته سوخت از محور افقی است. مقدار ثابت C_o تابعی از فشار و کسر بخار تولیدی است:

$$C_o = \frac{L(\alpha, P)}{K_o + (1-K_o)\alpha^r}$$

$$L(\alpha, P) = \frac{1 - e^{-\alpha c_1}}{1 - e^{-c_1}}$$

$$K_o = K_1 + (1-K_1) \left(\frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{1/4}, K_1 = \min(0.8, K_1^F), K_1^F = \frac{1}{1 + e^{-\frac{Re}{10000}}}$$

$$r = \frac{1 + 1.57 \frac{\rho_g}{\rho_f}}{1 - K_1}$$

$$C_1 = \frac{4}{\frac{P}{P_c} \left(1 - \frac{P}{P_c} \right)} \quad (80-2)$$

معادله‌ی زورر تابعی صریح از کیفیت است؛ اما معادله‌ی اپری، یک تابع غیرخطی و غیرصریح از کیفیت است که باید برای کسر تولیدی بخار در هر حجم کنترل حل شود.

۲-۶-۵ مدل تولید بخار

مدل اپری فرض می‌کند که تمام گرمای ایجادشده توسط دیواره‌ی گرم در همه‌ی الگوهای جریانی، فقط به مایع منتقل می‌شود. در حقیقت، قبل از خشک شدن دیواره، فرض می‌شود که دیواره خیس بوده و هیچ بخاری تولید نمی‌شود؛ اما بعد از این که شار حرارتی به مقدار بحرانی رسید، گرمای دیواره به خاطر وجود قطرات کوچک مایع برداشت می‌شود. فقط زمانی که مایع کاملاً بخار شود،

انتقال حرارت مستقیم به بخار وجود دارد؛ اما در این حالت می‌توان مقدار بخار تولیدی را صفر در نظر گرفت. مدل اپری فرض می‌کند که همگی گرمای پخش شده توسط دیواره‌ی فوق گرم، به جز لایه مرزی که انتقال حرارت از سطح به خنک‌کننده با جابه‌جایی اجباری برای گرم کردن مایع است، برای تبخیر مایع به‌کار گرفته می‌شود. بنابراین، در طول انتقال حرارت جوششی که با معادله‌ی تام^۱ ارایه شد، انتقال حرارت همرفتی برای تبخیر مایع در بازه‌ی بین دمای دیواره و دمای لایه‌ی مرزی (متوسط حسابی دمای اشباع سیال و دمای دیواره) با ضریب دیتوس بولتر محاسبه می‌شود. علاوه بر این، اگر دمای توده‌ی خنک‌کننده اشباع نباشد، ترم میعان به سمت صفر میل می‌کند؛ اما همگی گرمای تولید بخار نمی‌کند؛ چون کسری از گرمای تولیدی، مایع را گرم می‌کند. با تمام این فرضیات به معادله‌ی زیر برای مقدار تولید بخار می‌رسیم:

$$\beta = \max \left[\rho_l, \frac{h_f - h_l \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)}{h_g - h_l \left(\frac{\rho_l}{\rho_g} \right)} \right]$$

$$H_{Thom} = 0.105358e^{\frac{P}{T_w - T_{sat}}} (T_w - T_{sat})$$

$$H_m = H_{Thom} + \frac{1}{2} H_{DB}$$

$$\Gamma_v = \left[\frac{P_h \Delta x}{h_{fg} (1 + \beta)} \right] \left[\frac{q'' H_m}{H_{Thom} + H_{DB}} - \left(\frac{H_{DB} H_m}{H_{Thom} + H_{DB}} + H_{HN} \right) (T_{Sat} - T_l) \right] \quad (81-2)$$

۲-۶-۶ مدل نسبت لغزش

نسبت لغزش، نسبت سرعت فاز بخار به فاز مایع است. این نسبت که در مدل چهار معادله‌ای به‌کار می‌رود از یک معادله‌ی چندجمله‌ای با معادله‌ی بنکوف جونز حساب می‌شود.

$$s = \frac{1 - \alpha}{K - \alpha} \quad (82-2)$$

$$K = K_0 + (1 - K_0) \alpha^r \quad (83-2)$$

K_0 و r در معادله‌ی (۸۰-۲) توضیح داده شده‌اند.

1. Thom

۷-۶-۲ خصوصیات ترمودینامیکی و ترموفیزیکی آب

کد COBRA-EN با سیال آب تک فاز، دو فاز و بخار سروکار دارد که لزومی ندارد در شرایط تعادلی باشند. جریان‌های موجود در این کد جریان مایع سرد تک فاز، جریان دوفازی مایع سرد و بخار اشباع (برای معادلات بخار غیرهمگن)، جریان دوفازی مایع و بخار اشباع، جریان دوفازی مایع فوق گرم و بخار اشباع (مدل چهار معادله‌ای) و جریان تک فاز بخار داغ هستند. در جدول ۱-۲ خصوصیات خنک‌کننده‌ی آب و تابع و زیر برنامه‌ی مربوط به آن آورده شده است. برای تخمین خصوصیات مورد نیاز آب، تابعی استفاده می‌شود که توسط اپری برای برنامه‌ی کامپیوتری RETRAN نوشته شده است. در حقیقت تابع اپری می‌تواند در هر حجم کنترل برای محاسبه‌ی خصوصیات محلی خنک‌کننده به کار رود و برای محاسبات از درونیایی داخلی در نقاط مختلف استفاده می‌شود.

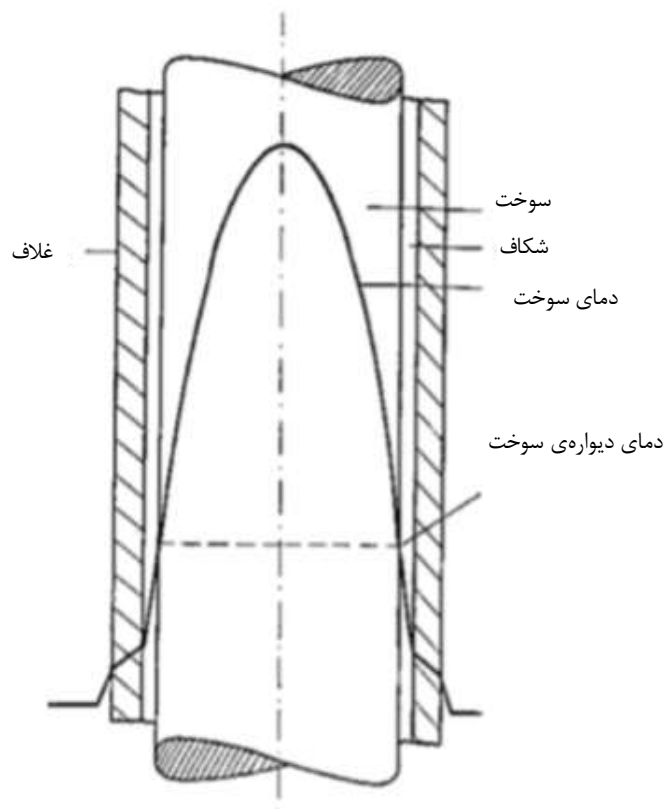
جدول ۱-۲. خصوصیات ترمودینامیکی و ترموفیزیکی آب.

زیر برنامه	تابع	خاصیت
HLIQSA	فشار	آنتالپی مایع اشباع
HVAPSA	فشار	آنتالپی بخار اشباع
TLIQ	آنتالپی و فشار	دمای مایع
TVAP	آنتالپی و فشار	دمای بخار
HLIQ	دما و فشار	آنتالپی مایع
HVAP	دما و فشار	آنتالپی بخار
CPLIQ	آنتالپی و فشار	گرمای ویژه‌ی مایع
CPVAP	آنتالپی و فشار	گرمای ویژه‌ی بخار
CONDUC	چگالی و دما	رسانندگی حرارتی
VISCOS	چگالی و دما	ویسکوزیته‌ی دینامیکی
SURTEN	دما	کشش سطحی

۷-۲ مدل‌های انتقال حرارت

مدل انتقال حرارت در کد COBRA-EN شامل دو بخش است. مدل حرارتی در میله‌ی سوخت و مدل انتقال حرارت از دیواره‌ی گرم به سیال خنک‌کننده. در هر بخش محوری با حل معادلات هدایت حرارتی، توزیع درجه حرارت در میله‌ی سوخت به دست می‌آید (شکل ۱-۲). در این مدل شرط مرزی شار حرارتی است و مقدار این شار برای اعمال در مدل حرارتی سوخت وابسته به دمای توده‌ی سیال (T_b) و ضریب انتقال حرارت (h) است که به ترتیب از مدل جریان و مدل انتقال

حرارت سطحی به دست می‌آیند. در این مدل از انتقال حرارت در جهت محوری صرف نظر شده و معادلات دیفرانسیل در جهت شعاعی با روش تفاضل محدود مرتبه‌ی اول تقریب زده می‌شود.

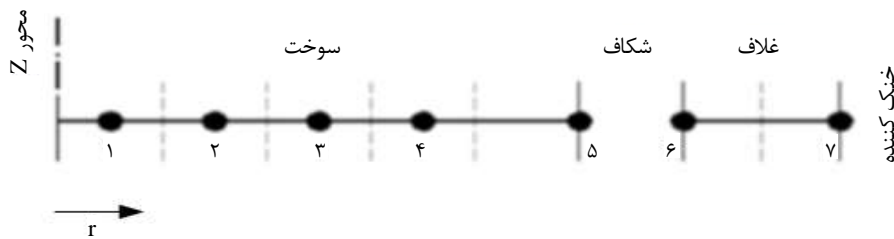


شکل ۲-۱۰. توزیع درجه حرارت در میله‌ی سوخت.

۲-۷-۱ مدل هدایت حرارتی میله‌ی سوخت

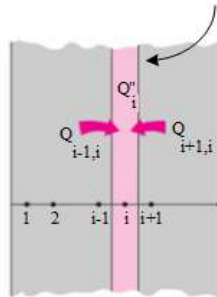
در کد COBRA-EN چند مدل حرارتی سوخت وجود دارد که مهم‌ترین آن، مدل اصلاح‌شده‌ی COBRA-3C است که معمولاً به مدل‌های دیگر ترجیح داده می‌شود. در هر بازه‌ی محوری، معادلات هدایت حرارتی با روش تفاضل محدود فقط در جهت شعاعی حل می‌شود. خواص میله‌ی سوخت را هم می‌توان ثابت و هم وابسته به درجه حرارت در نظر گرفت. قرص سوخت مطابق شکل ۲-۱۱ به بازه‌های شعاعی با فواصل مساوی تقسیم شده است. هر گره با اندیس i و مکان‌های شعاعی با r_i مشخص می‌شود. r_{i-1} و r_i مرزهای گره داخلی i هستند. T_i درجه حرارت هر گره است. بهتر است مکان هر گره طبق معادله‌ی (۲-۸۴) در مرکز حجم سلول محاسباتی در نظر گرفته شود.

$$\bar{r}_i = \frac{1}{\pi (r_i^2 - r_{i-1}^2)} \int_{r_{i-1}}^{r_i} \gamma r \pi r dr = \frac{\gamma}{3} \frac{r_i^3 + r_i r_{i-1} + r_{i-1}^3}{r_i + r_{i-1}} \quad (۸۴-۲)$$



شکل ۲-۱۱. نحوه‌ی در نظر گرفتن مش‌های شعاعی برای حل عددی مدل هدایت حرارتی سوخت. مکان گره‌های مجاور مرز (روی سطوح داخلی و خارجی غلاف و سطح خارجی قرص سوخت) روی سطح در نظر گرفته می‌شود. تعداد سلول‌های محاسباتی در ورودی کد براساس دقت مورد نیاز قابل تعیین است. کد COBRA-EN به طور خودکار دو گره برای غلاف در نظر می‌گیرد. بنابراین اگر تعداد سلول‌های محاسباتی N باشد، درجه حرارت سطح خارجی غلاف است. معادله‌ی موازنه‌ی حرارتی برای سلول محاسباتی i با توجه به شکل ۲-۱۲ به صورت زیر نوشته می‌شود.

المان حجمی گره



شکل ۲-۱۲. حجم کنترل سلول محاسباتی برای مدل حرارتی سوخت.

$$\left(\rho C_p V \right)_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = Q_{i-1,i} + Q_{i+1,i} + Q_i''' V_i \quad (۸۵-۲)$$

در معادله‌ی فوق ρ چگالی سوخت یا غلاف، C_p گرمای ویژه سوخت یا غلاف، V نشان‌دهنده‌ی حجم سلول محاسباتی، T درجه حرارت و Q_i''' نرخ تولید حرارت حجمی ناشی از شکافت است که در میله‌ی سوخت و غلاف آزاد می‌شود. نرخ انتقال حرارت از گره $(i-1)$ به گره i :

$$Q_{i-1,i} = -k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_{i-1}}$$

نرخ انتقال حرارت از گره $(i+1)$ به گره i :

$$Q_{i+1,i} = -k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_i}$$

در معادلات بالا k ضریب هدایت حرارتی است.

فرض می‌شود که سوخت بهتر است که یک توزیع شعاعی سهموی به صورت زیر در نظر گرفته شود.

$$Q'''_i = \frac{Q_F}{V_F} \left(1 + \eta \left[\left(\frac{\bar{r}_i}{R_F} \right)^2 - \frac{1}{2} \right] \right) \quad (۸۶-۲)$$

η پارامتر برازندگی^۱ که در ورودی کد قابل تعیین است، اگر $\eta=0$ باشد، فرض می‌شود که توزیع توان در سوخت به صورت یکنواخت است. مقدار η از ۰ تا ۲ قابل تغییر است.

به دلیل پیوستگی نرخ انتقال حرارت در مرز مشترک سلول‌های محاسباتی، برای سلول‌های

داخلی می‌توان نوشت:

$$Q_{i-1,i} = K_{i-1,i} (T_{i-1} - T_i) \quad (۸۷-۲)$$

$$Q_{i+1,i} = K_{i+1,i} (T_{i+1} - T_i) \quad (۸۸-۲)$$

ضرایب هدایت حرارتی $K_{i-1,i}$ (از گره‌های $i-1$ تا i) و $K_{i+1,i}$ (از گره‌های $i+1$ تا i) به صورت تابعی از ضریب هدایت حرارتی K و هندسه‌ی میله‌ی سوخت محاسبه می‌شوند:

$$K_{i-1,i} = K_{i,i-1} = \frac{2\pi r_{i-1} \Delta X_j k_i k_{i-1}}{k_i (r_{i-1} - \bar{r}_{i-1}) + k_{i-1} (\bar{r}_i - r_{i-1})} \quad (۸۹-۲)$$

$$K_{i+1,i} = K_{i,i+1} = \frac{2\pi r_i \Delta X_j k_i k_{i+1}}{k_{i+1} (r_i - \bar{r}_i) + k_i (\bar{r}_{i+1} - r_i)} \quad (۹۰-۲)$$

در معادلات فوق پارامتر ΔX_j ضخامت المان در جهت z است. با توجه به تقارن میله‌ی سوخت می‌توان شرط مرزی آدیاباتیک و تقارن در مرکز میله‌ی سوخت در نظر گرفت. بنابراین شرایط مرزی برای المان‌های مرزی به صورت زیر است.

$$Q_{i-1,i} \equiv Q_{0,1} = 0$$

برای گره‌ی یک:

1. Fitting

$$\begin{aligned}
Q_{i+1,i} &\equiv Q_{N-1,N-2} = H_{gap} (T_{N-1} - T_{N-2}) && \text{برای گرهی شماره ی } N-2 \\
Q_{i-1,i} &\equiv Q_{N-2,N-1} = H_{gap} (T_{N-2} - T_{N-1}) && \text{برای گرهی شماره ی } N-1 \\
Q_{i+1,i} &\equiv Q_{N+1,N} = H (T_b - T_N) && \text{برای گرهی شماره ی } N
\end{aligned}$$

در روش کانال جریان هر میله‌ی سوخت می‌تواند با چهار زیر کانال (برای چیدمان مربعی میله‌های سوخت) یا شش زیرکانال (برای چیدمان مثلثی میله‌های) در ارتباط باشد. چنانچه یک میله در مرکز کانال در نظر گرفته شود مشابه روش تحلیل قلب خواهد بود. در روش تحلیل قلب یک میله به طور متوسط نماینده‌ی همه‌ی میله‌های درون یک مجتمع سوخت است. شار حرارتی ورودی به سیال خنک‌کننده به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\begin{aligned}
q''_n &= \frac{1}{\sum_{l \in n} \Phi_{nl}} \sum_{l \in n} \Phi_{nl} H_{nl} (T_n - T_{bl}) = \frac{1}{\sum_{l \in n} \Phi_{nl}} \left[T_n \sum_{l \in n} (\Phi_{nl} H_{nl}) - \sum_{l \in n} (\Phi_{nl} H_{nl} T_{bl}) \right] \\
&= \frac{\sum_{l \in n} (\Phi_{nl} H_{nl})}{\sum_{l \in n} \Phi_{nl}} \left[T_n - \frac{\sum_{l \in n} (\Phi_{nl} H_{nl} T_{bl})}{\sum_{l \in n} (\Phi_{nl} H_{nl})} \right] \quad (91-2)
\end{aligned}$$

در معادله‌ی بالا نماد l نشان‌دهنده‌ی کانال یا مجتمع سوخت است. مقدار Φ_{nl} برای میله‌های واقع در گوشه و روی خط تقارن با میله‌های داخلی متفاوت است. مقادیر H_n و T_b را می‌توان به صورت محیطی، برای میله‌ی l متوسط‌گیری کرد. T_b درجه‌ی حرارت توده‌ی سیال و H_n ضریب انتقال حرارت بین میله‌ی سوخت و سیال است.

$$H_n = \frac{\sum_{l \in n} (\Phi_{nl} H_{nl})}{\sum_{l \in n} \Phi_{nl}}, \quad T_b = \frac{\sum_{l \in n} (\Phi_{nl} H_{nl} T_{bl})}{\sum_{l \in n} (\Phi_{nl} H_{nl})} \quad (92-2)$$

پس از نوشتن معادلات برای همه‌ی گره‌های سوخت و غلاف یک دستگاه معادلات سه‌بعدی برای هر میله‌ی سوخت و هر بازه‌ی محوری تشکیل می‌شود. مشخصات ترموفیزیکی سوخت و غلاف به صورت زیر در کد قابل تعیین است.

چگالی سوخت: یک مقدار ثابت در ورودی کد وارد می‌شود.

ضریب هدایت حرارتی سوخت: به صورت تابعی از دما (زیربرنامه‌ی UCONDU)

ضریب گرمای ویژه سوخت: به صورت تابعی از دما (زیربرنامه‌ی USPEHT)

چگالی غلاف: یک مقدار ثابت در ورودی کد وارد می‌شود.

ضریب هدایت حرارتی غلاف: به صورت تابعی از دما (زیربرنامه‌ی ZCONDU)

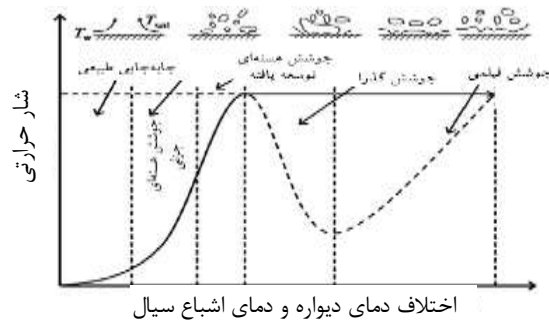
ضریب گرمای ویژه غلاف: به صورت تابعی از دما (زیربرنامه‌ی ZSPEHT)

۲-۷-۲ مدل انتقال حرارت از سطح میله‌ی سوخت به سیال

در کد COBRA-EN برای مدل کردن انتقال حرارت از سطح میله‌ی سوخت به سیال خنک‌کننده، از معادلات تجربی مناسب برای محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت یا شار حرارتی استفاده می‌شود. شکل ۲-۱۳ یک منحنی کامل جوشش است که با استفاده از معادلات انتقال حرارت (مورد استفاده در کد COBRA-EN) ترسیم شده است. این رژیم‌های انتقال حرارت عبارت‌اند از: (۱) جابجایی اجباری مایع تک فاز، (۲) جوشش هسته‌ای زیر اشباع، (۳) جوشش هسته‌ای اشباع، (۴) جوشش فیلمی و گذرا و (۵) جابه‌جایی اجباری بخار تک فاز. برای هر رژیم انتقال حرارت، شار حرارت عبوری از سطوح میله‌های سوخت با قانون سرمایه‌ی نیوتن بیان می‌شود.

$$Q = H (T_w - T_b) \quad (۲-۹۳)$$

در معادله‌ی (۲-۹۳) پارامتر T_w درجه حرارت سطح، T_b درجه حرارت توده‌ی سیال و H ضریب انتقال حرارت بین سطح و سیال است. مدل انتقال حرارت، شار حرارتی یا ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی را به وسیله‌ی معادلات تجربی هر رژیم جریان به دست می‌آورد. این مدل به صورت فصل مشترک مدل حرارتی سوخت (که دمای سطح را محاسبه می‌کند) و مدل جریان (که دمای توده‌ی سیال را محاسبه می‌کند) عمل می‌کند. الگوی انتقال حرارت در هر میله‌ی سوخت و هر بازه‌ی محوری به وسیله‌ی شرایط سیال محلی و دمای سطح میله‌ی سوخت تعیین می‌شود. اگرچه معادلات بسیاری برای محاسبه‌ی ضرایب انتقال حرارت در رژیم‌های مختلف انتقال حرارت وجود دارد؛ ولی تعداد محدودی از آن‌ها که معتبرتر هستند در کد COBRA-EN به خدمت گرفته شده‌اند که در جدول ۲-۲ آمده است.



شکل ۲-۱۳. منحنی جوشش که با استفاده از معادلات ضرایب انتقال حرارت.

جدول ۲-۲. معادلات ضرایب انتقال حرارت در رژیم‌های مختلف انتقال حرارت.

معادلات مورد استفاده در کد COBRA-EN	الگوی انتقال حرارت
Dittus-Boelter	جابه‌جایی اجباری جریان آرام و متلاطم تک فاز (مایع یا بخار)
Thom, Jens-Lottes and Rohsenow	جوشش هسته‌ای زیر اشباع
Thom and Rohsenow	جوشش هسته‌ای اشباع
modified Condie-Bengtson, interpolated Berenson and McDonough-Milich-King	جوشش گذرا
Groeneveld 5.7, Berenson and Dougall- Rohsenow	جوشش فیلمی
BAW-2, W-3, EPRI, Macbeth (12 coefficients), Macbeth (6 coefficients), Biasi and modified Barnett	شار حرارت بحرانی

۲-۷-۲-۱ ضریب انتقال حرارت برای جابه‌جایی تک‌فاز

معادله‌ی دیتوس بولتر برای محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری تک فاز در جریان درهم و آرام به صورت زیر قابل محاسبه هستند:

$$H_T = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \left(\frac{K}{D_h} \right) \quad (94-2)$$

$$H_L = \lambda \left(\frac{K}{D_h} \right) \quad (95-2)$$

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی تک فاز بیش‌ترین مقدار بین H_T و H_L است.

$$H_{SPFC} = \max(H_T, H_L) \quad (96-2)$$

تمامی خواص در دمای توده‌ی سیال حساب می‌شوند.

۲-۷-۲-۲ جوشش هسته‌ای اشباع و سرد

در این مورد معادله‌ی تام استفاده می‌شود:

$$q'' = 0.052358 e^{\frac{P}{63}} (T_w - T_{sat})^2$$

q'' شار حرارتی جوشش هسته‌ای است. واحدها در سیستم انگلیسی هستند. پیش فرض کد COBRA-EN برای ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی جوشش هسته‌ای، مجموع ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی تک‌فاز مایع و ضریب انتقال حرارت به‌دست آمده از معادله‌ی تام است.

$$H_{NB} = H_{SPFC} + \frac{q_{Thom}''}{T_w - T_b} \quad (97-2)$$

۲-۲-۷-۲ جوشش گذرا

برای محاسبه‌ی شار حرارتی برای این حالت در دبی‌های بالا از معادله‌ی اصلاح‌شده‌ی کاندی بنگستون^۱ استفاده می‌شود.

$$q_{TB}'' = C_1 e^{\frac{1}{\sqrt{10}} \sqrt{T_w - T_{sat}}} (T_w - T_{sat}) \quad (98-2)$$

که

$$C_1 = \frac{q_{CHF}'' - q_{FB}''}{T_{CHF} - T_{sat}} e^{\frac{1}{\sqrt{10}} \sqrt{T_{CHF} - T_{sat}}} \quad (99-2)$$

در معادلات فوق q_{FB}'' شار حرارتی جوشش گذرا است و به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$q_{FB}'' = H_{FB} (T_{CHF} - T_{sat})$$

شار حرارتی جوشش فیلمی در دمای شار حرارتی بحرانی و q_{CHF}'' شار حرارتی بحرانی است.

۲-۲-۷-۲ جوشش فیلمی

برای این مورد از معادله‌ی گرانولد^۲ استفاده می‌شود:

$$q_{FB}'' = H_{FB} (T_w - T_{sat})$$

$$Pr_f = \left(\frac{Cp_v \mu_v}{k_v} \right)_f \quad (100-2)$$

$$Re_{hom} = \frac{GD_h x}{\mu_g \alpha}$$

$$H_{FB} = 0.052 \frac{K_g}{D_h} Re_{hom}^{0.688} Pr_f^{1/26} / \gamma^{1/6}$$

$$\gamma = 1 - 0.1 \left[(1-x) \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} - 1 \right) \right]^{1/4} \quad (101-2)$$

1. Condie bengston
2. Groeneveld

توجه داشته باشید که خصوصیات بخار در دمای فیلم $T_f = \frac{1}{4}(T_{sat} + T_w)$ حساب می‌شوند. علامت ν نشان‌دهنده‌ی بخار فوق گرم است.

۲-۷-۳ معادلات محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت

معادلات بسیار دیگری برای محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت وجود دارند که در دماهای مختلف برای محاسبات ترموهیدرولیکی استفاده می‌شوند. در این بخش به تعریف تفصیلی این معادلات می‌پردازیم. معادلات انتقال حرارت مدل‌های تجربی هستند که برای اندازه‌گیری انرژی مبادله‌شده بین یک سطح جامد و سیال عبوری از روی آن گسترش یافته‌اند. معادلات انتقال حرارت به صورت ضریب انتقال حرارت در اختلاف دمای بین سطح و سیال ارایه می‌شوند:

$$q'' = h(T_w - T_{fluid}) \quad (102-2)$$

این معادله بر اساس مشاهدات تجربی به دست آمده است که معادله‌ی ساده‌سازی‌شده‌ای از تأثیرات پدیده‌های فیزیکی است که بر میزان انتقال حرارت از سطح اثر می‌گذارند. که این پدیده‌ها می‌توانند شامل خصوصیات ترمودینامیکی سیال، نیروهای دینامیک سیالاتی در لایه‌ی مرزی، اثرات تغییر فاز و هندسه سطح گرم‌شونده باشند. فرمول کلی وجود ندارد که بتواند در همه‌ی شرایط ضریب انتقال حرارت را محاسبه کند. فرمول‌های مخصوص برای موارد مختلف باید توسط مشاهدات تجربی استخراج شوند. برای انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری، رفتار کلی این معادله را می‌توان به پنج دسته تقسیم کرد: انتقال حرارت اجباری تک‌فازی به مایع زیر سرد (دسته‌ی اول)، جوشش هسته‌ای زیر اشباع (دسته‌ی دوم)، جوشش هسته‌ای اشباع (دسته‌ی سوم)، جوشش گذرای بالای شار حرارتی بحرانی (دسته‌ی چهارم)، جوشش فیلمی بالای شار حرارتی بحرانی (دسته‌ی پنجم) و در نهایت انتقال حرارت در بخار تک فاز.

۲-۷-۳-۱ انتقال حرارت تک فاز به مایع زیر سرد

معادله‌ی دیتوس بولتر برای محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت جریان درهم به صورت زیر است:

$$h_{turbulent} = 0.023 \left(\frac{K}{D_e} \right) Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (103-2)$$

که $h_{turbulent}$ ضریب انتقال حرارت جریان درهم است. برای جریان آرام نیز ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$h_{laminar} = 7.54 \left(\frac{K}{D_e} \right) \quad (104-2)$$

در نهایت ضریب انتقال حرارت موضعی برای انتقال حرارت تک فاز به مایع زیر سرد از معادله‌ی زیر به دست می‌آید:

$$h = \max(h_{turb}, h_{laminar}) \quad (105-2)$$

۲-۳-۷-۲ جوشش هسته‌ای زیر اشباع

معادله‌ی تام:

$$h = h_{NB} + h_{spl} \quad (106-2)$$

در معادله‌ی بالا، h_{NB} ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای و h_{spl} ضریب انتقال حرارت تک فاز است. هر یک از این پارامترها با توجه به معادلات زیر به دست می‌آیند:

$$h_{NB} = \left(\frac{e^{P/126}}{0.72} (T_S - T_{Sat}) \right)^2 / (T_S - T_b) \quad (107-2)$$

معادله‌ی چن!

این معادله ساختار مشابهی با معادله‌ی تام دارد. فرم کلی معادله‌ی چن به صورت زیر است:

$$h = \frac{(q''_{NB} + q''_{FC})}{T_S - T_b} \quad (108-2)$$

در این معادله، q''_{NB} شار حرارتی جوشش هسته‌ای و q''_{FC} شار حرارتی اجباری تک فاز است. این پارامترها به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$q''_{NB} = h_{NB} (T_S - T_{Sat}) \quad (109-2)$$

$$h_{NB} = 0.0122S \left(\frac{k_f^{0.79} c_{pf}^{0.45} \rho_f^{0.49}}{\sigma^{0.5} \mu_f^{0.29} h_{fg}^{0.24} \rho_g^{0.24}} \right) (T_S - T_{Sat})^{0.24} (P_S - P)^{0.75} \quad (110-2)$$

که در معادلات بالا، S فاکتور فشارندگی دوفازی و P_S فشار اشباع متناظر با دمای سطح میله است. در نهایت شار حرارتی جابه‌جایی اجباری نیز به صورت زیر ارزیابی می‌شود:

$$q''_{FC} = 0.023 \left(\frac{K}{D_e} \right) Re^{0.8} Pr^{0.4} (T_S - T_b) \quad (111-2)$$

۲-۳-۷-۳ جوشش هسته‌ای اشباع

برای این منظور می‌توان از معادله‌ی تام استفاده کرد؛ اما معادلات دیگری نیز برای محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای اشباع وجود دارند از جمله:

معادله‌ی چن:

این معادله هم برای جوشش زیر سرد و هم برای جوشش هسته‌ای اشباع کاربرد دارد؛ اما در این بخش از فرم اصلاح‌شده‌ی این معادله استفاده می‌شود. زمانی که دمای سیال در دمای اشباع است، مقدار شار حرارتی جابه‌جایی اجباری از معادله‌ی زیر به دست می‌آید:

$$q_{FC} = 0.023F \left(\frac{K_f}{D_e} \right) Re_{\tau\phi} Pr^{0.4} (T_s - T_b) \quad (112-2)$$

عدد رینولدز دوفازی است که به صورت زیر حساب می‌شود:

$$Re_{\tau\phi} = \frac{(1-x)GD_e}{\mu_f} \quad (113-2)$$

فاکتور عدد رینولدز، تابعی تجربی از معکوس فاکتور مارتینلی است:

$$\lambda = x_{tt}^{-1} = \left(\frac{x}{1-x} \right)^{0.9} \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_g}{\mu_f} \right)^{0.1} \quad (114-2)$$

در جدول ۲-۳، معادله‌ی بین F و λ خلاصه شده است.

جدول ۲-۳. مقادیر فاکتور عدد رینولدز و معکوس فاکتور مارتینلی برای معادله‌ی چن.

F	۱,۰۷	۱,۲۱	۱,۴۲	۱,۶۳	۲,۰۲	۲,۷۵	۴,۳
λ	۰,۱	۰,۲	۰,۳	۰,۴	۰,۶	۱,۰	۲,۰
F	۵,۶۰	۶,۷۵	۹,۱۰	۱۲,۱۰	۲۲,۰۰	۴۴,۷۰	۷۶,۰۰
λ	۳,۰	۴,۰	۶,۰	۱۰,۰	۲۰,۰	۵۰,۰	۱۰۰,۰

فاکتور فشارندگی دوفازی (S)، که در ترم شار حرارتی بحرانی جوشش هسته‌ای اشباع و زیر سرد وجود دارد، تابعی از فاکتور رینولدز دوفازی اصلاح شده است.

$$Re_{TP} = \left(\frac{Re}{10^4} \right) F^{1.25} \quad (115-2)$$

که Re ، عدد رینولدز سیال همگن است. جدول ۲-۴، فاکتور فشارندگی (S) را به عنوان تابعی از عدد رینولدز دوفازی اصلاح‌شده (Re_{TP}) نشان می‌دهد.

جدول ۲-۴. فاکتور فشارندگی بر حسب تابعی از عدد رینولدز دو فازی اصلاح شده.

S	۱۰۰۰	۰٫۸۹۳	۰٫۷۹۳	۰٫۷۰۳	۰٫۶۲۹	۰٫۵۱۳	۰٫۳۷۵
$(Re)F^{1/25}$	۱۰۰۰	۱۰۰۰۰	۲۰۰۰۰	۳۰۰۰۰	۴۰۰۰۰	۶۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰
S	۰٫۲۱۳	۰٫۱۴۲	۰٫۱۱۵	۰٫۰۹۳	۰٫۰۸۳	۰٫۰۶۰	
$(Re)F^{1/25}$	۲۰۰۰۰۰	۳۰۰۰۰۰	۴۰۰۰۰۰	۶۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰۰۰	

۲-۷-۳-۴ جوشش گذرای بالای شار حرارتی بحرانی

معادله‌ی تانگ یانگ^۱ اصلاح شده:

این معادله شار حرارتی جوشش گذرا به عنوان تابعی از شار حرارتی بحرانی و شار حرارتی جوشش فیلمی بیان می‌کند.

$$q_{TB}'' = C_1 (q_{CHF}'' - q_{FB}'') \quad (2-116)$$

در این معادله، q_{CHF}'' شار حرارتی بحرانی و q_{FB}'' شار حرارتی جوشش فیلمی است. C_1 ضریب تجربی است که تابعی از شار حرارتی و فوق گرم بودن دیواره است.

$$C_1 = e^{-0.012X} \left[\frac{GD_e h_{fg}}{q_{total}''} \right]^{0.1} (\Delta T_f)^{1.6} \quad (2-117)$$

$$q_{total}'' = q_{TB}'' + q_{FB}'', \quad \Delta T_f = T_S - T_{sat} \quad (2-118)$$

معادله‌ی برنارد گریفیث^۲:

معادله‌ی برنارد گریفیث شار حرارتی جوشش گذرا (q_{TB}'') را با درونیابی بین پارامترهای شار حرارتی بحرانی (q_{CHF}'') و شار حرارتی در کمینه دمایی جوشش فیلمی (q_{MFB}'') برای شرایط ترموهیدرولیکی موضعی محاسبه می‌کند.

$$q_{TB}'' = \delta q_{CHF}'' + (1 - \delta) q_{MFB}'' \quad (2-119)$$

که در این معادله δ فاکتور درونیابی است و به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$\delta = \left(\frac{T_S - T_{MFB}}{T_{CHF} - T_{MFB}} \right)^2 \quad (2-120)$$

1. Tong young
2. Bjornard griffith

در معادله‌ی بالا T_{CHF} دمای شار حرارتی بحرانی و T_{MFB} کمینه‌ی دمای جوشش فیلمی است.

$$T_{MFB} = T_{sat} + 0.29 \Delta T_{BER} \left(1.0 - 0.295x^{0.745} \right) \left(1.0 + 0.36G^{0.49} \right) \quad (121-2)$$

در این معادله ΔT_{BER} فوق گرم بودن دیواره در کمینه دمای جوشش فیلمی است.

$$\Delta T_{BER} = 0.127 \left(\frac{\rho_{vf} h_{fg}}{k_{vf}} \right) \left(\frac{g(\rho_f - \rho_g)}{\rho_f + \rho_g} \right)^{1/4} \left(\left(\frac{g_c}{g} \right) \frac{\sigma}{\rho_f - \rho_g} \right)^{1/4} \left(\frac{\mu_{vf}}{g(\rho_f - \rho_g)} \right)^{1/4} \quad (122-2)$$

در این معادله k_{vf} رسانندگی حرارتی بخار در دمای فیلم، ρ_{vf} چگالی بخار در دمای فیلم و μ_{vf} ویسکوزیته‌ی بخار در دمای فیلم است. دمای فیلم نیز از معادله‌ی زیر بدست می‌آید:

$$T_{vf} = \frac{T_s + T_{sat}}{2} \quad (123-2)$$

معادله‌ی کاندی بنگستون اصلاح‌شده:

شار حرارتی جوشش گذرا به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$q_{TB}'' = C_1 e^{-0.5(T_s - T_{sat})^{0.5}} (T_s - T_{sat}) \quad (124-2)$$

که C_1 پارامتر تجربی است و به صورت زیر قابل تعریف است:

$$C_1 = e^{\ln(q_{CHF}'' - q''(T_{CHF})_{FB}) + 0.5(T_{CHF} - T_{sat})^{0.5} - \ln(T_{CHF} - T_{sat})} \quad (125-2)$$

در معادله‌ی بالا $q''(T_{CHF})_{FB}$ شار حرارتی جوشش فیلمی در دمای شار حرارت بحرانی است:

$$q''(T_{CHF})_{FB} = h_{FB} (T_{CHF} - T_{sat}) \quad (126-2)$$

۲-۷-۳-۵ جوشش فیلمی بالای شار بحرانی

معادله‌ی گراندولد ۵/۹:

$$q_{FB}'' = h_{FB} (T_s - T_{sat}) \quad (127-2)$$

که ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی h_{FB} از معادله‌ی زیر حساب می‌شود:

$$h_{FB} = C_1 \left(\frac{K_g}{D_e} \right) Re_{HOM}^A Pr_w^B Y^C \quad (128-2)$$

در معادله‌ی (۱۲۸-۲)، C_1 ، A ، B و C ضرایب تجربی، Y پارامتر تجربی، Pr_w عدد پرانتل در دمای دیواره، Re_{HOM} عدد رینولدز دو فازی همگن و K_g ضریب رسانندگی حرارتی بخار اشباع است.

$$Re_{HOM} = \frac{Gx D_e}{\alpha \mu_g} \quad (129-2)$$

که α کسر بخار همگن و μ_g ویسکوزیته‌ی بخار اشباع است.

$$\alpha = \frac{x}{x + \left(\frac{\rho_g}{\rho_f}\right)(1-x)} \quad (130-2)$$

و در نهایت مقدار Y برابر است با:

$$Y = 1.0 - 0.1 \left[\left(\frac{\rho_f}{\rho_g} - 1 \right) (1-x) \right]^{0.4} \quad (131-2)$$

مقادیر C_1 ، A ، B و C نیز در جدول ۵-۲ آورده شده‌اند.

جدول ۵-۲. مقادیر ثابت معادله‌ی گراندول.

ضریب	گرانولد ۵٫۷	گرانولد ۵٫۹
C_1	۰٫۰۵۲	۰٫۰۰۳۲۷
A	۰٫۶۸۸	۰٫۹۰۱
B	۱٫۲۶	۱٫۳۲
C	-۱٫۰۶	-۱٫۵

معادله‌ی بیشاپ سندبرگ تانگ!:

این معادله مشابه معادله‌ی گراندول است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$q_{FB}'' = h_{FB} (T_s - T_{sat}) \quad (132-2)$$

$$h_{FB} = 0.193 \left(\frac{K_{vf}}{D_e} \right) Re_{vf}^{0.8} Pr_{vf}^{1.23} \left(\frac{\rho_g}{\rho_b} \right)^{0.68} \left(\frac{\rho_g}{\rho_f} \right)^{0.68} \quad (133-2)$$

$$\rho_b = \alpha \rho_g + (1-\alpha) \rho_f \quad (134-2)$$

در معادلات بالا، K_{vf} رسانندگی حرارتی خنک‌کننده در دمای فیلم، Re_{vf} و Pr_{vf} عدد رینولدز و پرانتل محاسبه شده بر طبق خصوصیات سیال در دمای فیلم و ρ_b چگالی توده‌ی سیال است.

معادله‌ی گراندول دلرمه!:

معادله‌ی مذکور شار حرارتی جوشش فیلمی را با استفاده از دمای بخار حساب می‌کند:

1. Bishop sandberg tong

1. Groeneveld delorme

$$q''_{FB} = h_{FB} (T_s - T_v) \quad (135-2)$$

در این معادله T_v دمای بخار متناظر با آنتالپی بخار محاسبه شده در معادله‌ی (2-139) است. برای ضریب انتقال حرارت جوشش فیلمی داریم:

$$h_{FB} = 0.008348 \left(\frac{K_{vf}}{D_e} \right) \left[\frac{GD_e}{\mu_{vf}} \left(x_a + \frac{\rho_v}{\rho_f} (1 - x_a) \right) \right]^{0.8774} Pr_{vf}^{0.6112} \quad (136-2)$$

$$T_{vf} = \frac{T_s + T_{sat}}{2} \quad (137-2)$$

$$x_a = x \left(\frac{h_{fg}}{h_v - h_f} \right) \quad (138-2)$$

در معادلات بالا x_a کیفیت تعادلی اصلاح شده، T_{vf} دمای فیلم، ρ_v چگالی بخار در آنتالپی بخار محاسبه شده از معادله‌ی (2-139)، μ_{vf} ویسکوزیته‌ی بخار در دمای فیلم، Pr_{vf} عدد پرانتل با خصوصیات سیال در دمای فیلم و K_{vf} رسانندگی حرارتی بخار در دمای فیلم و h_v آنتالپی فاز بخار است که از معادله‌ی زیر حساب می‌شود:

$$h_v = h_g + h_{fg} e^{-\psi} e^{-\sqrt{(2\alpha)^2} \psi} \quad (139-2)$$

در این معادله ψ پارامتر مدل تجربی است و به صورت زیر است:

$$\psi = \tan \left[C_1 \left(1.3 \times 10^{-7} - 1.0833x + 0.8455x^2 \right) \right] \quad (140-2)$$

و C_1 تابعی تجربی بر حسب پارامترهای جریان است:

$$C_1 = \frac{0.13864 Pr_g^{0.2031} Re_{HOM}^{0.2006}}{\left[\frac{q'' D_e c_{pg}}{k_g h_{fg}} \right]^{0.9222}} \quad (141-2)$$

k_g رسانندگی گرمایی بخار اشباع، Pr_g عدد پرانتل در شرایط بخار اشباع، c_{pg} گرمای ویژه بخار اشباع و h_{fg} گرمای نهان تبخیر است.

2-7-3-6 جوشش بالای شار بحرانی برای شرایط جریان کم

این مدل برای انتقال حرارت جوششی بالای شار حرارتی بحرانی انتخاب می‌شود اگر دبی جرمی پایین‌تر از $0.2 \frac{Mlb}{hr.ft^2}$ باشد. تفاوتی بین جوشش گذرا و جوشش فیلمی در این ناحیه نیست. شار حرارتی سطحی به صورت زیر تخمین زده می‌شود:

$$q'' = h_{postCHF} (T_s - T_{sat}) \quad (142-2)$$

ضریب انتقال حرارت در این ناحیه معادله‌ی جوشش فیلمی بروملی است. این معادله در دبی‌های کم جریان و کیفیت تعادلی پایین صادق است.

$$h_{postCHF} = 0.62 \left[\frac{D_e}{\sqrt{\left(\frac{g_c}{g} \right) \frac{\sigma}{\rho_f - \rho_{vf}}}} \right]^{0.172} \left[\frac{k_{vf} \rho_{vf} (\rho_f - \rho_{vf}) h_{fg} g}{D_e \mu_{vf} \Delta T_f} \right]^{0.25} \quad (143-2)$$

که ΔT_f درجه‌ی فوق گرم بودن دیواره است و برابر است با:

$$\Delta T_f = T_s - T_{sat} \quad (144-2)$$

۷-۳-۷-۲ انتقال حرارت تک فاز به فاز بخار

این مدل برای شرایطی است که دمای توده‌ی سیال از دمای اشباع بالاتر باشد و سیال به شکل بخار تک فاز رفتار کند. ضریب انتقال حرارت تک‌فاز (h_{spv}) در این ناحیه با استفاده از معادله‌ی دیتوس بولتر با خصوصیات سیال در دمای بخار محاسبه می‌شود:

$$h_{spv} = 0.23 \left(\frac{K_v}{D_e} \right) Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (145-2)$$

در این معادله K_v رسانندگی حرارتی در دمای بخار است. برای شرایطی که کیفیت تعادلی بزرگ‌تر از یک است، ضریب انتقال حرارت به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$h = \min(h_{FB}, h_{spv}) \quad (146-2)$$

مقدار h_{spv} از معادله‌ی (۱۴۵-۲) محاسبه می‌شود و مقدار h_{FB} از معادله‌ی (۱۴۳-۲) به دست می‌آید.

۴-۷-۲ معادلات شار حرارتی بحرانی^۱

این معادلات برای محاسبه‌ی دو پارامتر نسبت شار حرارتی هسته‌ای بحرانی و نسبت انحراف از نقطه‌ی جوش هسته‌ای^۲ استفاده می‌شود. در این مورد از معادلات اپری استفاده می‌شود:

1. Critical heat flux
2. Departure from nucleate boiling ratio

$$q_{CHF}'' = \frac{1}{0.0036} \times \frac{AF_A - X_{in}}{CF_C F_g F_{nu} + \left(\frac{h - h_{in}}{0.0036 q'' h_{fg}} \right)} \quad (147-2)$$

$$A = 0.5328 P_r^{0.1212} (0.0036 G)^{-0.304 - 0.3258 P_r}$$

$$C = 1.6151 P_r^{1.4066} (0.0036 G)^{-0.4843 - 2.0749 P_r}$$

در معادلات بالا P_r نسبت فشار سیستم به فشار بحرانی، h_{in} آنتالپی ورودی، h_{fg} آنتالپی تبخیر، h آنتالپی موضعی، F_A ، F_C ، F_g و F_{nu} فاکتورهای اختیاری هستند که شار حرارتی بحرانی را تصحیح می‌کنند و مقدار پیش فرض یک دارند. برای دیواره‌ی سرد به خصوص در رآکتورهای آب جوشان مقادیر F_A و F_B تابعی از دبی خنک‌کننده (G) هستند.

$$F_A = (0.0036 G)^{0.1}$$

$$F_C = 1.183 (0.0036 G)^{0.1}$$

معادلات برای شبکه‌های جداکننده مربوط به ضریب افت فشار C_g است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F_g = 1.3 - 0.2 C_g$$

$$F_{nu} = 1 + \frac{Y - 1}{1 + 0.0036 G}$$

و در نهایت معادله‌ی فلاکس حرارتی غیریکنواخت در سطح محوری x به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$Y = \frac{\int_0^x q''(x) dx}{q''(x)x}$$

برای شار حرارتی یکنواخت $Y=1$ است. معادلات دیگری برای محاسبه‌ی شار حرارت بحرانی و ضریب انتقال حرارت وجود دارند. از این معادلات می‌توان به معادلات اپری، بورینگ، مک بث^۱، اصلاح‌شده زوبر^۳ و بیاسی^۴ اشاره کرد که در ادامه به توضیح این معادلات می‌پردازیم.

1. Bowring
2. Macbeath
3. Modified zuber
4. Biasie

۲-۴-۷-۱ معادله‌ی اپری

این معادله با استفاده از محدوده‌ی وسیعی از داده‌های تجربی گرفته‌شده از رآکتورهای آب تحت فشار و آب جوشان در دانشگاه کلمبیا به دست آمد. این معادله برای استفاده محدودیت‌هایی دارد که عبارت‌اند از: فشار باید بین ۲۰۰ تا ۲۴۰۰ psia باشد، دبی جرمی بین $0.2-4.5 \text{ Mlb/hr.ft}^2$ باشد، کیفیت تعادلی از $0.25-$ تا 0.75 باشد، برای هندسه‌های 3×3 ، 4×4 ، 5×5 مجتمع‌های سوخت رآکتورهای تجاری آب سبک مناسب است، طول گرم‌شده 30 ، 48 ، 66 ، 72 ، 84 ، 96 ، 144 ، 150 و 168 اینچ باشد، پروفایل توان یکنواخت بوده و توزیع توان شعاعی یکنواخت و مقدار بیشینه آن 1.3 باشد. این معادله دامنه‌ی وسیعی از فشار را پوشش می‌دهد و حتی تا فشار 2450 psia می‌توان برون‌یابی را انجام داد.

$$q_{CHF}'' = \frac{A - x_{in}}{C + \frac{x - x_{in}}{q_L''}}$$

$$A = C_1 P_r^{C_2} G^{C_3 + C_4 P_r}$$

(۱۴۸-۲)

$$C = C_5 P_r^{C_6} G^{C_7 + C_8 P_r}$$

در معادله‌ی (۱۴۸-۲)، q_{CHF}'' شار حرارتی بحرانی، x_{in} کیفیت تعادلی در ورودی، q_L'' شار حرارتی محلی در سطح میله (BTU/hr.ft^2)، A و C ثوابت تجربی هستند. در جدول ۲-۶ این ثوابت آورده شده‌اند.

جدول ۲-۶. ثوابت بهینه‌شده‌ی معادله‌ی اپری.

C_1	0.5328
C_2	0.1212
C_3	1.6151
C_4	1.4066
C_5	-0.3040
C_6	0.4843
C_7	-0.3285
C_8	-2.749

در معادلات بالا ($P_r = P/P_C$) کسر فشار نسبی بحرانی است که P فشار سیستم و P_C فشار بحرانی (۳۲۰۸/۲ psia) است. G دبی جرمی محلی و C_n ثوابت بهینه سازی شده است که از برآورد

داده‌های تجربی با منحنی‌های آماری به دست آمده‌اند. معادله‌ی (۲-۱۴۸) می‌تواند با سه فاکتور تصحیح، اصلاح شود:

الف) فاکتور تصحیح دیواره‌ی دو طرف سرد برای رئوس مجتمع‌های سوخت خصوصاً در رآکتورهای آب جوشان،

ب) فاکتور تصحیح شبکه‌ی نگاه‌دارنده،

ج) فاکتور تصحیح توان غیریکنواخت.

فاکتور تصحیح اول به صورت زیر می‌تواند در معادله‌ی (۲-۱۴۸) اعمال شود:

$$q_{CHF}'' = \frac{AF_A - x_{in}}{CF_c + \frac{x - x_{in}}{q_L''}} \quad (۲-۱۴۹)$$

مقادیر F_A و F_c به صورت زیر قابل محاسبه هستند:

$$F_A = G^{0.1}$$

$$F_c = 1.83G^{0.1}$$

فاکتور تصحیح شبکه‌ی نگاه‌دارنده به صورت زیر در معادله‌ی (۲-۱۴۸) لحاظ می‌شود:

$$q_{CHF}'' = \frac{A - x_{in}}{CF_g + \frac{x - x_{in}}{q_L''}} \quad (۲-۱۵۰)$$

که F_g به صورت زیر است:

$$F_g = 1.3 - 0.3C_g$$

C_g ضریب افت برای شبکه‌ی نگاه‌دارنده است. برای فاکتور تصحیح سوم نیز می‌توان به صورت زیر عمل کرد:

$$q_{CHF}'' = \frac{A - x_{in}}{CF_{nu} + \frac{x - x_{in}}{q_L''}} \quad (۲-۱۵۱)$$

فاکتور توان محوری غیریکنواخت به صورت زیر است:

$$F_{nu} = 1 + \frac{Y - 1}{1 + G}$$

Y فاکتور توان محوری غیریکنواخت بورینگ است.

۲-۴-۷-۲ معادله‌ی بورینگ

معادله‌ی شار بحرانی بورینگ در محدوده‌های زیر قابل استفاده است: فشار باید بین ۹۰-۲۲۵ psia باشد، دبی جرمی بین ۳۷۰-۴۰۴ Mlb/hr.ft^۲ باشد، قطر هیدرولیکی بین ۰٫۳ تا ۱٫۴ اینچ باشد، برای هندسه‌های ۳×۳، ۴×۴، ۵×۵ مجتمع‌های سوخت رآکتورهای تجاری آب سبک مناسب است، طول گرم‌شده ۶۰ تا ۱۸۰ اینچ باشد، ضرایب محوری توان ۱٫۰ تا ۱٫۳۸ بوده و ضرایب شعاعی آن ۱٫۰ تا ۱٫۳۲ باشد. فرم کلی معادله‌ی بورینگ به صورت زیر است:

$$q_{CHF}'' = \frac{A - B \Delta h_{in}}{C + ZY} \quad (۱۵۲-۲)$$

A و B پارامترهای تجربی هستند که در ادامه این پارامترها تعریف شده‌اند. A تابعی از دبی سیال، فشار و هندسه‌ی سیستم است و به صورت زیر قابل تعریف است:

$$A = \frac{۲۴۲٫۲ F_G D_e}{1 + \left(\frac{۱٫۵۲ (F_p D_e)^2 G}{F_p D_h^{1/2} \left[1 + G (0.8) F_p \left(\frac{D_e}{D_h} \right) - 1 \right]} \right)^2} \quad (۱۵۳-۲)$$

در معادله‌ی فوق F_p ضریب قله‌ی شعاعی، F_1 و F_p پارامترهای تجربی هستند که تابع فشار هستند:

$$F_1 = \left[۱٫۰ - ۰٫۰۴ P_T \sqrt{(1 + ۰٫۴۷ P_T^2)} \right]^2 \quad (۱۵۴-۲)$$

$$F_p = \begin{cases} ۰٫۴۵ + ۱٫۲۵ P_T & P \leq ۴۱۵ \text{ psia} \\ ۰٫۴۲۴ + ۱٫۹۵۹ P_T - ۱٫۵۵۶ P_T^2 & ۴۱۵ < P \leq ۶۵۰ \text{ psia} \\ (۳٫۲ - P_T)(۰٫۳۲ + ۰٫۱۳۵ P_T) & P > ۶۵۰ \text{ psia} \end{cases} \quad (۱۵۵-۲)$$

$P_T = ۰٫۰۰۱ P$ است. معادله‌ی (۱۵۱-۲) برای فشار زیر ۱۲۵ psia است. در صورتی که فشار بالای

۱۲۵ psia باشد، A از معادله‌ی (۱۵۶-۲) حساب می‌شود:

$$A = A_p + (۲٫۲۵ - ۰٫۰۰۱ P)(A_1 - A_p) \quad (۱۵۶-۲)$$

که در معادله‌ی (۱۵۶-۲)، A_1 همان A در معادله‌ی (۱۵۱-۲) و A_p فاکتور تصحیح است.

$$A_p = ۱٫۸۱ G + \frac{۹٫۵ G D_e}{۰٫۱ + G} \quad (۱۵۷-۲)$$

مقدار B از معادله‌ی زیر قابل محاسبه است:

$$B = 0.25e^{-\gamma G} GD_e \quad (158-2)$$

$$C = 6GD_h^{0.5\gamma} G^{-\gamma Y} \left(1 + \frac{Y-1}{G+1} \right) \quad (159-2)$$

پارامتر Y فاکتور تصحیح شار حرارتی غیریکنواخت محوری است و به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$Y = \frac{\int_0^Z \bar{q}''(z) dz}{\bar{q}''(z)z} \quad (160-2)$$

انتگرال معادله‌ی (۱۶۰-۲) با گسسته‌سازی در راستای محوری حل می‌شود.

$$\frac{\int_0^Z \bar{q}''(z) dz}{\bar{q}''(z)z} = \frac{\sum_{j=1}^j \bar{q}''_j \Delta X_j}{\bar{q}''_j X_j} \quad (161-2)$$

در معادله‌ی فوق، \bar{q}''_j شار حرارتی محوری متوسط شعاعی در گره j ، X_j فاصله‌ی محوری از شروع طول گرم‌شده، ΔX_j طول بازه‌ی محوری j ، Z شماره‌ی اندیس بازه و J اندیس گره محوری متناظر با فاصله‌ی محوری Z است.

۲-۴-۷-۳ معادله‌ی مک‌بث

این معادله توسط مک‌بث و تامپسون گسترش یافت. این معادله از روی اطلاعات وسیعی از داده‌های تجربی برای میله‌های گرم‌شده یکنواخت با جریان عمودی رو به بالا به دست آمده است که برای محدوده‌ی زیر قابل استفاده است:

فشار بین ۱۵-۲۷۰۰ psia، دبی جریان بین ۱۳.۷-۰.۷۳ Mlb/hr.ft²، طول گرم‌شده ۱/۰ تا ۱۴۴ اینچ و پروفایل محوری توان یکنواخت باشد. معادله‌ی مک‌بث از دو تابع مجزا تشکیل شده است که یکی برای شرایط جریان کم و دیگری برای شرایط جریان زیاد است. در شرایط جریان کم، ارتباط بین دبی جرمی و شار حرارتی بحرانی تقریباً خطی است و مستقل از فشار است. برای این شرایط، معادله‌ی شار حرارتی بحرانی به صورت زیر است:

$$q''_{CHF} = 0.00633 h_{fg} D_e^{-\gamma} \left(\frac{G}{1.6} \right)^{0.51} (1-X) \quad (162-2)$$

برای شرایط جریان زیاد، شار حرارت بحرانی تابعی پیچیده از دبی جرمی، کیفیت تعادلی، هندسه و فشار است. شکل معادله برای این ناحیه به صورت زیر است:

$$q_{CHF}'' = \left(\frac{A - 0.125 h_{fg} D_e \left(\frac{G}{10^6} \right) X}{C} \right) \quad (163-2)$$

در این معادله A و C پارامترهای تجربی هستند که با استفاده از دو دسته داده‌ی تجربی به دست آمده‌اند: دسته‌ی اول که با ۱۳۴۴ داده به دست آمده و شرایط زیر را دارند:

فشار باید بین ۱۵-۲۷۰۰ psia، دبی جریان بین ۱-۷/۸۲-۱۰۰۱ Mlb/hr.ft^۲، قطر هیدرولیکی بیش‌تر از ۰/۰۴ و کم‌تر از ۰/۹۳۴ اینچ باشد و در نهایت طول گرم‌شده بیش‌تر از ۱ و کم‌تر از ۱۲۳ اینچ باشد.

$$A = y_1 D_e^{y_1} \left(\frac{G}{10^6} \right)^{y_2} \quad (164-2)$$

$$B = y_2 D_e^{y_2} \left(\frac{G}{10^6} \right)^{y_5} \quad (165-2)$$

جدول ۲-۷ ضرایب ثابت معادله‌ی مک‌بث شش ضریبی را نشان می‌دهد.

جدول ۲-۷. ثوابت معادله‌ی مک‌بث شش ضریبی.

فشار (psia)	y_0	y_1	y_2	y_3	y_4	y_5
۲۵۰	۱۰۶/۵	۰/۸۴۷	۰/۶۷۷	۶۰/۳	۱/۴	۰/۹۳۷
۵۳۰	۱۲۳/۵	۰/۸۳۴	۰/۴۰۸	۷۸/۸	۱/۴	۰/۷۳۷
۱۰۰۰	۱۲۴/۵	۰/۹۱۳	۰/۳۷۶	۱۱۸	۱/۴	۰/۵۵۵
۱۵۷۰	۵۹/۹	۰/۸۷۳	۰/۱۲۰	۸۲/۷	۱/۴	۰/۰۹۶
۲۰۰۰	۶۷/۵	۱/۱۳۰	۰/۵۳۵	۱۰۸	۱/۴	۰/۳۴۳
۲۷۰۰	۱/۳	-۰/۰۵۵	۱/۰۲	۱۰۳	۱/۴	۰/۵۲۹

دسته‌ی دوم نیز با ۱۵۷۶ داده و با شرایط روبه‌رو به دست آمده است: فشار بین ۱۵-۲۷۰۰ psia، دبی جریان بین ۱۳/۷-۱۳/۷۳ Mlb/hr.ft^۲، قطر هیدرولیکی بیش‌تر از ۰/۰۴ و کم‌تر از ۱/۴۷۵ اینچ باشد و نهایتاً طول گرم‌شده بیش‌تر از ۱ و کم‌تر از ۱۴۴ اینچ باشد.

$$A = y_0 D_e^{y_1} \left(\frac{G}{10^6} \right)^{y_2} \left[1 + y_3 D_e + y_4 \left(\frac{G}{10^6} \right) + y_5 D_e \left(\frac{G}{10^6} \right) \right] \quad (166-2)$$

$$C = y_3 D_e^{y_3} \left(\frac{G}{10^6} \right)^{y_8} \left[1 + y_4 D_e + y_{10} \left(\frac{G}{10^6} \right) + y_{11} D_e \left(\frac{G}{10^6} \right) \right] \quad (167-2)$$

در معادلات بالا y_n ضرایب تجربی هستند که در جدول ۸-۲ آورده شده‌اند.
جدول ۸-۲. ضرایب معادله‌ی مک‌بث دوازده ضریبی.

ضرایب	فشار (psia)			
	۵۶۰	۱۰۰۰	۱۵۵۰	۲۰۰۰
y_0	۲۳۷	۱۱۴	۳۶	۶۵٫۵
y_1	۱٫۲	۰٫۸۱۱	۰٫۵۰۹	۱٫۱۹
y_2	۰٫۴۲۵	۰٫۲۲۱	-۰٫۱۰۹	۰٫۳۷۶
y_3	-۰٫۹۴	-۰٫۱۲۸	-۰٫۱۹	-۰٫۵۷۷
y_4	-۰٫۰۳۲۴	۰٫۰۲۷۴	۰٫۰۲۴	۰٫۲۲
y_5	۰٫۱۱۱	-۰٫۰۶۶۷	۰٫۴۶۳	-۰٫۳۷۳
y_6	۱۹٫۳	۱۲۷	۴۱٫۷	۱۷٫۱
y_7	۰٫۹۵۹	۱٫۳۲	۰٫۹۵۳	۱٫۱۸
y_8	۰٫۸۳۱	۰٫۴۱۱	۰٫۱۹۱	-۰٫۴۵۶
y_9	۲٫۶۱	-۰٫۲۷۴	۰٫۲۳۱	-۱٫۵۳
y_{10}	-۰٫۰۵۷۸	-۰٫۰۳۹۷	۰٫۰۷۶۷	۲٫۷۵
y_{11}	۰٫۱۲۴	-۰٫۰۲۲۱	۰٫۱۱۷	۲٫۲۴

۴-۴-۷-۲ معادله‌ی اصلاح‌شده‌ی زوبر

این معادله برای رآکتورهای آب سبک در حوادث شدید و برای جریان‌های خیلی کم صادق است. معادله‌ی اصلاح‌شده‌ی زوبر بر پایه‌ی هیدرودینامیک شار حرارتی بحرانی جوشش استخری^۱ است و مستقل از فشار است. معادله‌ی اصلاح‌شده‌ی زوبر برای جریان سیال کم‌تر از 0.2 Mlb/hr.ft^2 و

حجم بخار بالای 80° درصد مناسب است. شکل عمومی این معادله به صورت زیر است:

$$q_{CHF}'' = 0.1309 F_G F_{subc} h_{fg} \sqrt{\rho_g} \left(\sigma g_c g (\rho_f - \rho_g)^{0.25} \right) \quad (168-2)$$

1. Pool boiling

که در معادله‌ی فوق، F_{subc} فاکتور تصحیح برای شرایط سیال زیر سرد و F_G فاکتور تصحیح برای کسر حجمی بخار است.

$$F_G = 0.90(1-\alpha) \quad (169-2)$$

$$F_{subc} = 1 + 0.065 \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} \right)^{0.18} \left(\frac{c_{pf} (T_{sat} - T_b)}{h_{fg}} \right) \quad (170-2)$$

۲-۷-۴-۵ معادله‌ی بیاسی^۱

معادله‌ی بیاسی دو فرمول‌بندی مجزا برای شار حرارتی بحرانی دارد:

$$q''_{CHF} = \max(q''_{CHF \ 1}, q''_{CHF \ 2}) \quad (171-2)$$

$$q''_{CHF \ 1} = b_1 G^{b_2} (F_P G^{b_3} - x) D_e^{-n} \quad (172-2)$$

$$F_P = b_4 + b_5 Pe^{b_6 P} \quad (173-2)$$

$$q''_{CHF \ 2} = c_1 G^{c_2} (F_H (1-x)) D_e^{-n} \quad (174-2)$$

$$n = \begin{cases} 0.6 & \rightarrow D_e < 1 \\ 0.4 & \rightarrow D_e \geq 1 \end{cases} \quad (175-2)$$

$$F_H = c_3 + c_4 Pe^{c_5 P} + \left(\frac{c_6 P}{c_7 + P^2} \right) \quad (176-2)$$

که در معادلات (۱۷۲-۲) و (۱۷۴-۲)، c_n فاکتور تجربی، F_P و F_H فاکتور تجربی وابستگی فشار، b_n فاکتور تجربی و n مضرب قطر هیدرولیکی است.

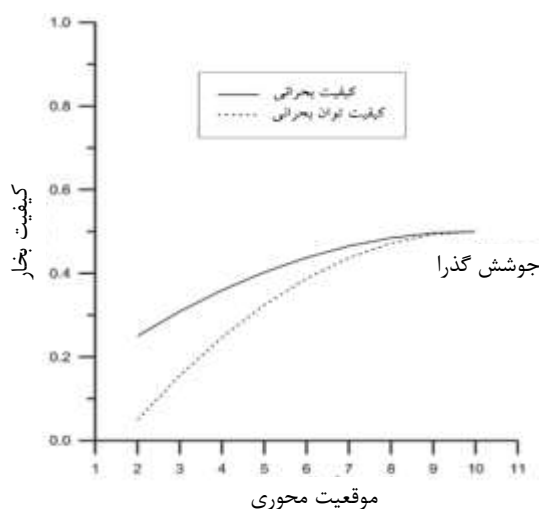
۲-۷-۵ توان بحرانی

این معادلات فقط برای پیش‌بینی نسبت توان بحرانی مجتمع‌های سوخت بعد از محاسبات جریان استفاده می‌شوند. بنابراین در نسخه‌ی اخیر COBRA-EN این معادلات برای تحلیل قلب می‌توانند استفاده شوند. با ثابت نگه داشتن تغییرات محوری توان، توان کلی کانال تغییر پیدا می‌کند تا توزیع محوری کیفیت معادل به توزیع کیفیت بحرانی مماس شود (شکل ۲-۱۴). این جستجوی تکراری فقط به طول اشباع محدود می‌شود. نسبت توان بحرانی^۲ با نسبت شار حرارتی بحرانی متفاوت است.

2. Biasi

1. Critical Power Ratio (CPR)

نسبت توان بحرانی با یک پارامتر (توان کلی کانال) به جای توزیع شار حرارتی محوری سروکار دارد. این نسبت به صورت نسبت بین توان بحرانی به توان عملیاتی هر کانال مشخص می‌شود. از توزیع کانال به کانال این نسبت، کم‌ترین نسبت توان بحرانی^۱ تعیین می‌شود. سپس حاشیه‌های ایمنی در ارتباط با چالش‌های حرارتی و چینش سوخت داخل قلب رآکتور تخمین زده می‌شود. این مقدار بحرانی در کد با معادلات مختلفی از جمله G.E.X.L، CISE-3 و CISWCR تخمین زده می‌شود.



شکل ۲-۱۴. نمودار کیفیت بخار بر حسب موقعیت محوری برای جستجوی شار بحرانی.

۲-۷-۶ مدل هدایت شکاف

انتقال حرارت بین دیواره‌ی میله‌ی سوخت و دیواره‌ی داخلی غلاف دو مکانیسم را شامل می‌شود: تابش حرارتی و رسانندگی حرارت در گاز. خصوصیات حرارتی مورد نیاز از جمله تابندگی و پخش‌کنندگی سطح قرص سوخت، رسانندگی گاز پرکننده^۲ شکاف تابعی از دما است که از مدل متپرو^۳ گرفته شده است. به هر حال، مدل تغییر شکل میله‌ی سوخت و رسانندگی به خاطر تماس فیزیکی بین قرص سوخت و غلاف لحاظ نشده است. بنابراین مدل رسانایی شکاف باید با احتیاط و متناسب با ضخامت غلاف و قطر قرص سوخت وارد شود یا از مقادیر ثابت ورودی استفاده شود.

1. Minimum critical power ratio

۲. پرکننده‌ی شکاف ابتدا هلیوم بوده و پس از شکافت نیز محصولات شکافت گازی با هلیوم مخلوط می‌شوند.

3. Matpro

۲-۸ شرایط مرزی، توابع نیرو و همگرایی

فشار خروجی به عنوان فشار مرجع سیستم استفاده می‌شود هم‌چنین، شرایط مرزی برای دبی جرمی، غلظت بور و آنتالپی یا دما در ورودی هر کانال باید تعیین شود. در برخی موارد دبی جرمی ورودی یک‌بار برای همه‌ی کانال‌ها محاسبه می‌شود. موارد زیر به شکل شرط مرزی تعیین می‌شوند:

الف) دبی جرمی ورودی یکنواخت در همه‌ی کانال‌ها.

ب) ورودی توزیع غیریکنواخت توسط کاربر.

ج) توزیع جریان ورودی نامشخص، تخمین زدن توسط اعمال گرادیان فشار مشابه برای همه‌ی کانال‌ها (حالت پایا).

فرض کنید که گرادیان فشار ورودی متناسب با مربع مقدار جریان ورودی باشد و نیروی گرادیان فشار هر کانال i برابر مقدار متوسط گرادیان فشار $\left(\frac{dP}{dx}\right)$ باشد. جریان تنظیم شده به صورت زیر در می‌آید.

$$m'_{i_1} = m_{i_1} \left[1 + \frac{\overline{\frac{dP}{dx}} - \left(\frac{dP}{dx}\right)_{i_1}}{\left(\frac{dP}{dx}\right)_{i_1}} \right] \quad (2-177)$$

$$\frac{\overline{dP}}{dx} = \frac{\sum_{i=1}^I A_i \left(\frac{dP}{dx}\right)_{i_1}}{\sum_{i=1}^I A_i} \quad (2-178)$$

گرادیان فشار ورودی با استفاده از معادله‌ی (۲-۱۴) محاسبه می‌شود. بنابراین تکرارهایی برای رسیدن به همگرایی برای معادلات (۲-۱) و تکانه‌ی محوری لازم است. اگر افت فشار یکنواختی توسط کاربر به همه‌ی کانال‌ها داده شود؛ یعنی اگر شرایط مرزی جریان ورودی توسط شرایط مرزی فشار ورودی جایگزین شوند، دبی کل ورودی و توزیع جریان تنظیم می‌شوند. با فرض این‌که افت فشار منهای افت فشار ناشی از جاذبه‌ی متناسب با مربع دبی ورودی باشد و نیروی افت فشار هر کانال i برابر با افت فشار لازم شود ΔP (افت فشار متوسط) داریم:

$$m'_{i\lambda} = m_{i\lambda} \left[1 + \frac{\overline{\Delta P} - \rho_j \lambda H_i}{\Delta P_i - \rho_j \lambda H_i} \right] \quad (179-2)$$

$$\overline{\Delta P} = \frac{\sum_{i=1}^I A_i (\Delta P)_i}{\sum_{i=1}^I A_i} \quad (180-2)$$

در معادلات بالا H_i ارتفاع گرانشی و $\rho_j \lambda$ فاکتور تضعیف است.

$$H_i = \sum_{j=1}^J \rho_j \Delta x_j \cos \theta \quad (181-2)$$

با شروع از شرایط غیرقابل تغییر دبی جرمی ورودی، جریان‌های کانال منفرد به صورت زیر اصلاح می‌شوند:

$$\sum_{i=1}^I \delta m_{i\lambda} = \sum_{i=1}^I \frac{\partial m_{i\lambda}}{\partial P_{i\lambda}} \delta P_{i\lambda} = 0 \quad (182-2)$$

$$m'_{i\lambda} = m_{i\lambda} + \frac{\partial m_{i\lambda}}{\partial P_{i\lambda}} \left[\frac{\sum_{i=1}^I \frac{\partial m_{i\lambda}}{\partial P_{i\lambda}} P_{i\lambda}}{\sum_{i=1}^I \frac{\partial m_{i\lambda}}{\partial P_{i\lambda}}} - P_{i\lambda} \right] \quad (183-2)$$

که مشتقات جریان‌های ورودی نسبت به فشار توسط مقادیر جریان و فشار در تکرارهای خارجی محاسبه می‌شوند.

در محاسبات گذرا، توابع نیرو برای پنج پارامتر توان کلی، فشار سیستم، دبی متوسط، دبی جرمی، غلظت ورودی و آنتالپی ورودی می‌تواند فراهم شود. توابع نیرو برای پارامترهای دیگر ممکن است برای نواحی مختلف کانال تعریف شود. در هر مورد، توابع نیرو باید به صورت جدول‌هایی وارد شوند که در آن‌ها مقادیر نسبی این تابع نسبت به زمان قرار دارند. برای زمان‌های میانی، درونیایی خطی انجام می‌شود. همگرایی سریع در کم‌تر از ده تکرار اتفاق می‌افتد؛ اما در حالت گذرای سریع، سرعت همگرایی ممکن است کاهش چشم‌گیری یابد و مشکلات همگرایی از جمله رفتار نوسانی زیاد شود. راه اصلی برای غلبه بر مشکلات همگرایی کاهش اندازه‌ی گام زمانی است. کد COBRA-EN به صورت اتوماتیک بازه زمانی انتخابی را کنترل نمی‌کند. در محاسبات فشار، مهم‌ترین مشکل همگرایی است. برای حل این مشکل باید از روش نیوتن رافسون استفاده شود، چون این روش پایدارتر بوده و همگرایی‌اش سریع‌تر است. با این پیشنهادات، در موارد دشوار فقط دو مدل انتظار

می‌رود که جواب‌های بهتری ارائه دهد. مدل سه معادله‌ای با معادلات بخار همگن و روش نیوتن رافسون جواب‌های خوبی می‌توانند ارائه دهند.

۲-۹ خلاصه و جمع‌بندی مطالب فصل

در این فصل گفته شد که تحلیل با کد COBRA-EN به دو صورت تحلیل زیرکانال و تحلیل قلب رآکتور صورت می‌گیرد. در تحلیل زیرکانال رفتار میله‌های سوخت ارزیابی شده و در تحلیل قلب رآکتور، رفتار ترموهیدرولیکی مجتمع‌های سوخت تجزیه و تحلیل می‌شود. هم‌چنین معادلات اساسی به‌کار رفته در کد و روش‌های حل این معادلات در این فصل معرفی شده و در موردشان توضیح داده شد. از مهم‌ترین روش‌های حل این معادلات می‌توان به روش تعادلی همگن و روش چهار معادله‌ای اشاره کرد که بسته به نوع مسئله، توسط کاربر این روش‌ها انتخاب می‌شوند. نهایتاً معادلات تجربی مورد استفاده برای محاسبه‌ی ضرایب انتقال حرارت و شار حرارتی معرفی شدند. در فصل‌های بعدی نحوه‌ی نگارش و آماده‌سازی ورودی برای کد تشریح می‌شود.

۲-۱۰ مراجع

1. COBRA-EN Code System for Thermal-Hydraulic Transient Analysis of Light Water Reactor Fuel Assemblies and Cores, Milano, Italy through the Nuclear Energy Agency Data Bank.
2. N.E. Todreas, M.S. Kazimi: Nuclear Systems II Elements of Thermal Hydraulic Design, New York (1990).
3. N.E. Todreas, M.S. Kazimi: Nuclear Systems I Elements of Thermal Hydraulic Design, New York (1990).
4. D.H. Hwang, Y.J. Yoo, W.K. In, S.Q. Zee: Assessment of the interchannel mixing model with a subchannel analysis code for BWR and PWR conditions, Nucl. Eng. Des. 199 (2000).
5. C.W. Stewart: VIPRE-01: a Thermal-Hydraulic Analysis Code for Reactor Cores, EPRI NP-2511-CCM, Electric Power Research Institute Research Project (1983).
6. D.L. Hagrman, G.A. Reymann, R.E. Mason: MATPRO-Version 11 (Revision 2): a Handbook of Materials Properties for Use in the Analysis of Light Water Reactor Fuel Rod Behavior, Idaho National Engineering Laboratories, Revision 2 (1980).
7. K.J. Geelhood, W.G. Luscher, C.E. Beyer, J.M. Cuta: FRAPTRAN 1.4: A Computer Code for the Transient Analysis of Oxide Fuel Rods, U.S.NRC (2011).

فصل سوم: ورودی کد COBRA-EN

مشابه بسیاری از کدهای محاسباتی هسته‌ای فایل ورودی کد COBRA-EN یک فایل متنی است که مشتمل بر ۳۹ کارت است. پارامترهای ورودی که شامل اطلاعات هندسی و شرایط مرزی و توزیع توان و غیره هستند، به صورت فرمت‌بندی شده بوده و با زبان برنامه نویسی فرترن^۱ نوشته شده‌اند. قبل از توصیف کارت‌های ورودی لازم است که در ابتدا انواع مدل‌سازی در کد به لحاظ فضا و یا حجم مورد بررسی بیان شود.

۳-۱ انواع مدل‌سازی در کد

کد COBRA-EN مخصوص مدل‌سازی قلب رآکتور است و با توجه به جزئیات مورد بررسی فضای مسئله می‌تواند به دو صورت تعریف شود:

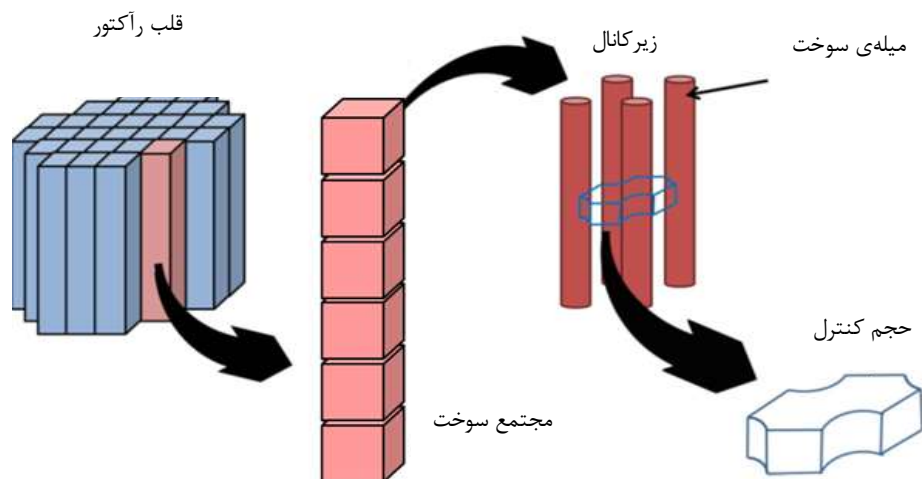
۳-۱-۱ مدل‌سازی مجتمع‌های سوخت

در این حالت قلب رآکتور یا بخشی از قلب رآکتور به عنوان فضای محاسباتی در نظر گرفته می‌شود و هر مجتمع به عنوان یک کانال جریان در نظر گرفته می‌شود. این کانال‌های جریان در جهت محوری به چندین بخش تقسیم می‌شوند. در جهت شعاعی تقسیم‌بندی در ابعاد یک مجتمع است و مجتمع در راستای شعاعی به حجم‌های کوچک‌تری تقسیم نمی‌شود. خواص سیال به صورت متوسط جبری برای هر بخش محوری مجتمع به دست می‌آید. در این حالت محاسبات حرارتی سوخت برای یک میله‌ی سوخت به نمایندگی از همه‌ی میله‌های واقع در مجتمع سوخت و با توجه به خواص متوسط سیال در هر مجتمع به دست می‌آید. به این حالت در کد COBRA-EN روش تحلیل قلب^۲ رآکتور گفته می‌شود.

۳-۱-۲ مدل‌سازی چند میله‌ی سوخت یا یک مجتمع سوخت

در این حالت مجتمع سوخت یا بخشی از مجتمع سوخت به عنوان فضای محاسباتی در نظر گرفته می‌شود و تک تک میله‌های سوخت مورد توجه قرار می‌گیرد و فضای بین چند میله به عنوان کانال جریان در نظر گرفته می‌شود و در جهت محوری به چندین بخش تقسیم می‌شود. به این حالت در کد COBRA-EN روش تحلیل زیرکانال^۳ گفته می‌شود. شکل ۳-۱ مطالب مذکور را نشان می‌دهد.

-
1. Fortran
 2. Core analysis
 3. Subchannel analysis



شکل ۳-۱. نمایش نحوه‌ی در نظر گرفتن فضای حل مسئله در دو حالت تحلیل قلب و تحلیل زیرکانال.

۳-۲ کارت‌های ورودی کد

همان‌طور که گفته شد ورودی این کد شامل ۳۹ کارت است و در هر سطر فقط یک کارت قرار می‌گیرد. مقدار پارامترهای هر کارت فقط در جایگاه خاصی، از ستون ۱ تا حداکثر ستون ۷۲ در هر سطر قرار می‌گیرد. در روبه‌روی هر کارت فرمت ورودی داده‌ها در داخل پرانتز نشان داده شده است. لازم به ذکر است در انتهای هر کارت فرمت نوشتن آن کارت نیز ذکر شده است. برای مثال 18A4 یعنی ورودی باید رشته‌ای از حروف چهارتایی حداکثر به تعداد هجده عدد باید وارد شود. 4I6 نشان‌دهنده‌ی آن است که ورودی این کارت شامل ۴ تا ۶ کاراکتر و به صورت عدد صحیح است. فرمت 6E12.5 یعنی این که ورودی کارت شامل شش عدد اعشاری است که هر عدد اعشاری حداکثر ۱۲ کاراکتر باید داشته باشد و ۵ عدد آن بعد از ممیز باشد. 3X نیز معرف آن است که سه کاراکتر فضای خالی باید گذاشته شود.

کارت ۱: توضیحات کاربر برای مسئله (18A4)

برای مثال:

Subchannel Analysis of 26 subchannel

کارت ۲: روش محاسبات (4I6)

کاراکترهای ۱ تا ۶: روش تحلیل (Core analysis:۰, Subchannel analysis:۱)

(۷-۱۲): سیستم واحد ورودی (Si:۲, AE:۱)

(۱۳-۱۸): سیستم واحد خروجی (Si:۲, AE:۱)

(۱۹-۲۴): تعیین مدل ترموهیدرولیکی

° مدل سه معادله‌ای COBRA (مدل همگن)

۱: مدل چهار معادله‌ای COBRA (جرم بخار نیز به معادلات اضافه می‌شود).

۲: مدل چهار معادله‌ای TWIGL (این مدل برای رآکتورهای BWR مناسب است).

کارت ۳: پارامترهای ترموهیدرولیکی عمومی (12I6)

(۱-۶): نوع کانال‌ها: ۱: کانال‌های باز (مناسب برای رآکتورهای PWR)، ۲: کانال‌های مجزا (مناسب

برای رآکتورهای BWR)

(۷-۱۲): تعداد کانال‌ها

(۱۳-۱۸): تعداد میله‌های سوخت برای حالت Subchannel analysis یا تعداد کانال‌های کنارگذر

برای حالت Core analysis

(۱۹-۲۴): تعداد حجم کنترل در جهت محوری

(۲۵-۳۰): تعداد انواع کانال‌ها

(۳۱-۳۶): تعداد شبکه‌ها در هر مجتمع سوخت (حداکثر ۱۰)

(۳۷-۴۲): تعداد انواع شبکه (حداکثر ۵)

(۴۳-۴۸): تعداد گره‌های محاسباتی در یک میله‌ی سوخت در جهت شعاعی برای محاسبات توزیع

درجه حرارت در میله‌ی سوخت (اگر برابر صفر قرار دهیم از محاسبات حرارتی سوخت صرف‌نظر

می‌شود).

(۴۹-۵۴): برای فعال‌سازی ارتباط بین میله‌ی سوخت و زیر کانال استفاده می‌شود که به صورت

پیش فرض صفر در نظر می‌گیرند.

(۵۵-۶۰): در این قسمت جالی خالی قرار داده می‌شود (عددی وارد نمی‌شود).

(۶۱-۶۶): به صورت پیش فرض یک در نظر گرفته می‌شود.

(۶۷-۷۲): تعداد انواع سوخت برای مدل COBRA و TWIGL (حداکثر ۱۰)

کارت ۴: فواصل محوری یا ارتفاع هر حجم کنترل (6E12.5)

(۱-۱۲): ارتفاع هر حجم کنترل از پایین به بالا (اگر ارتفاع حجم کنترل‌ها یکسان است فقط یک

مقدار با علامت منفی داده شود).

کارت ۵: توان خطی در هر حجم کنترل (این کارت شامل سه بخش a ، b و c است).

توان خطی تولیدی در هر میله‌ی سوخت

5a: یک سطر (I6)

(1-6): تعداد حجم کنترل‌ها در جهت محوری

5b: یک سطر (E12.5)

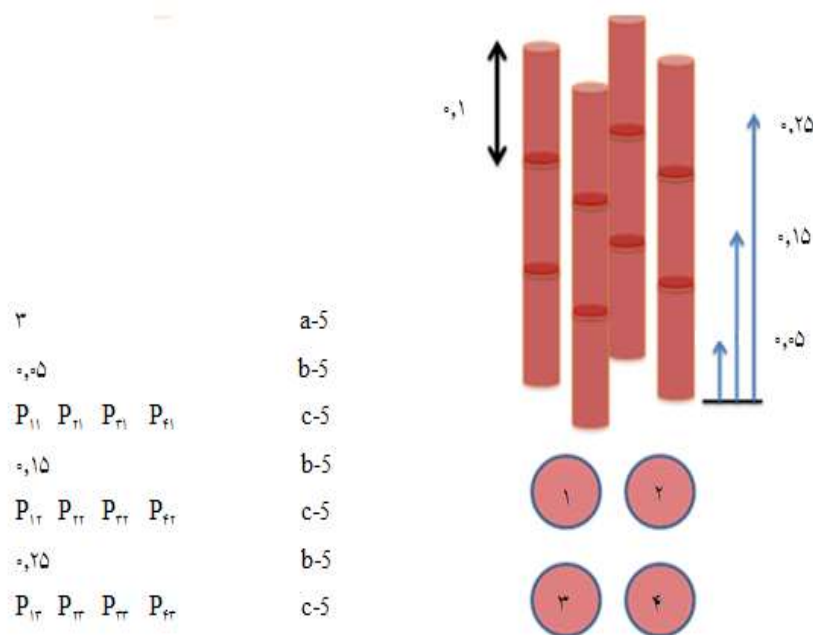
(1-12): مختصات محوری مراکز حجم کنترل

5c: یک سطر یا بیش تر (6E12.5)

(1-12): توان خطی میله یا حجم کنترل N در بازه‌ی محوری $5b$

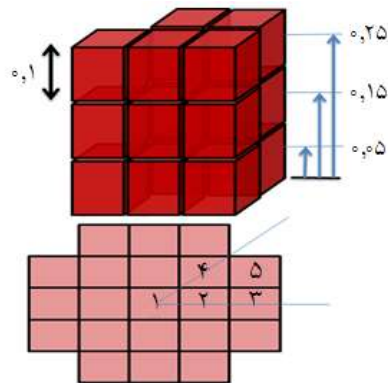
قسمت‌های b و c به تعداد بازه‌های محوری تکرار می‌شوند.

در شکل ۲-۳ تعیین توزیع توان چهار میله‌ی سوخت برای کارت ۵ برای حالت زیر کانال نشان داده شده است. مقادیر P_{nj} نشان‌دهنده‌ی توان میله‌ی سوخت n در سطح ارتفاعی z است. در مثال شکل ۲-۳، n از ۱ تا ۴ و z از ۱ تا ۳ است. $5b$ و $5c$ به تعداد بازه‌های محوری باید تکرار شوند. در جهت محوری سه بازه در نظر گرفته شده است.



شکل ۲-۳. نمایش چهار میله‌ی سوخت برای تعیین توزیع توان در میله‌ها.

در شکل ۲-۳، تعیین توزیع توان چهار مجتمع سوخت برای کارت ۵ برای حالت تحلیل قلب رآکتور نشان داده شده است.



شکل ۳-۳. نمایش قلب رآکتور برای تعیین توزیع توان در میله‌ها.

کارت ۶: اطلاعات مربوط به میله‌ها و چینش میله‌ها (2I6,3E6.0,2I6,3E6.0,I6)

این کارت زمانی وارد می‌شود که عدد نهم در کارت ۳، صفر نباشد. در این کارت تعریف چینش میله‌های سوخت فقط به دو صورت مربعی و مستطیلی صورت می‌گیرد.

(۱-۶): تعداد میله‌ی سوخت در هر محور افقی یا عمودی

(۷-۱۲): نشان تقارن برای مرز پایین (عدد صفر نشانگر عدم وجود تقارن است. اگر یک گذاشته شود، متقارن در نظر می‌گیرد).

(۱۳-۱۸): فاصله‌ی میله‌ی اول از مرز چپ

(۱۹-۲۴): فاصله‌ی مرکز تا مرکز دو میله‌ی متوالی در هر ردیف افقی

(۲۵-۳۰): فاصله‌ی میله‌ی آخر از مرز راست

(۳۱-۳۶): تعداد میله‌های سوخت در هر ردیف عمودی

(۳۷-۴۲): نشان تقارن برای مرز چپ (مشابه تقارن برای مرز پایین)

(۴۳-۴۸): فاصله‌ی میله‌ی سوخت از مرز پایین در هر ردیف افقی

(۴۹-۵۴): فاصله‌ی مرکز تا مرکز دو میله‌ی متوالی در هر ردیف ستونی

(۵۵-۶۰): فاصله‌ی میله‌ی آخر در هر ستون از مرز بالا

(۶۱-۶۶): قطر میله‌ی سوخت

(۶۷-۷۲): نشان مشخص کننده‌ی نوع سوخت

کارت ۷: ارتباط بین کانال‌ها (3X,I3,3X,4(I3,2E6.0))

برای هر کانال فقط یک سطر لازم است.

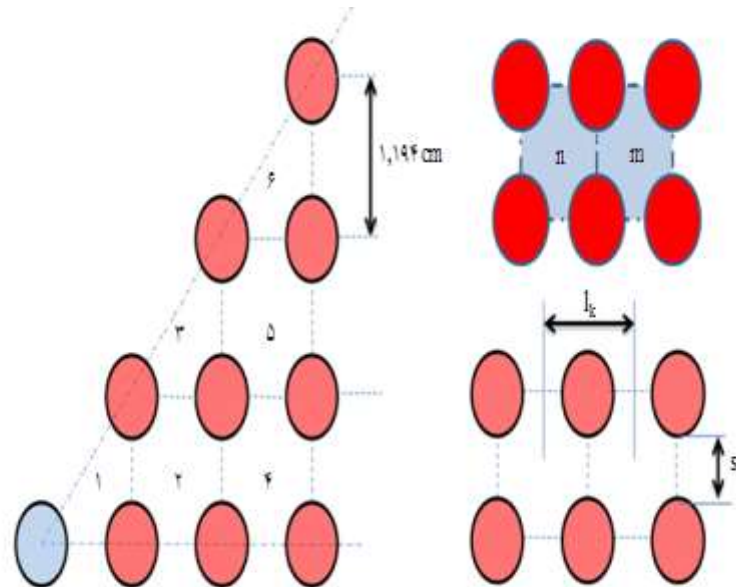
۷a: شماره‌ی کانال n

۷b: شماره‌ی کانال مجاور کانال n (۱۲-۱۰):

۷c: طول مرز همسایگی (۱۳-۱۸):

۷d: فاصله‌ی مرکز تا مرکز کانال n و کانال مجاور آن.

b ، c و d برای کانال‌های مجاور بعدی در ادامه سطر تکرار می‌شوند. توجه داشته باشید که شماره‌ی کانال مجاور که خط تقارن از میان آن بگذرد با علامت منفی نشان‌گذاری می‌شود. (شامل خطوط تقارن ۴۵ درجه هم نمی‌شود). اگر خط تقارن از میان کانال n یا از کنار آن گذشته باشد به تعریف تعداد کم‌تری کانال مجاور نیاز است. برای چیدمان مربعی تنها تعیین دو کانال مجاور مثلاً سمت راست و بالا برای کانال n کافی است. در شکل‌های ۳-۴، ۳-۵ و ۳-۶، نحوه‌ی ورودی این کارت مشخص شده است.



$$S_x = P - d_{\text{top}} = 1,194 - 0,45 = 1,224 \text{ cm}$$

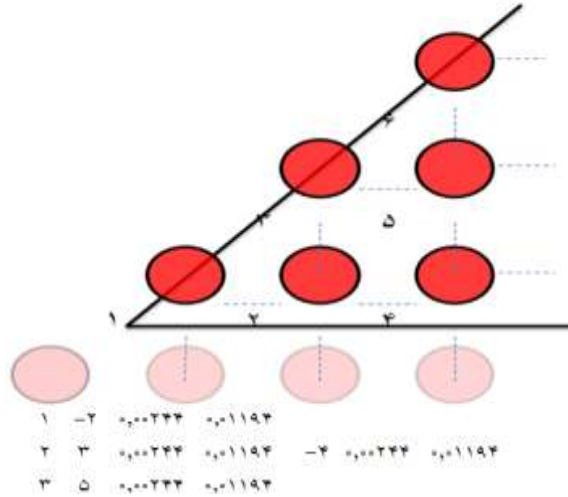
$$I_x = P = 1,194 \text{ cm}$$

$$1 \quad 2 \quad s_1 = 244 \quad s_2 = 194$$

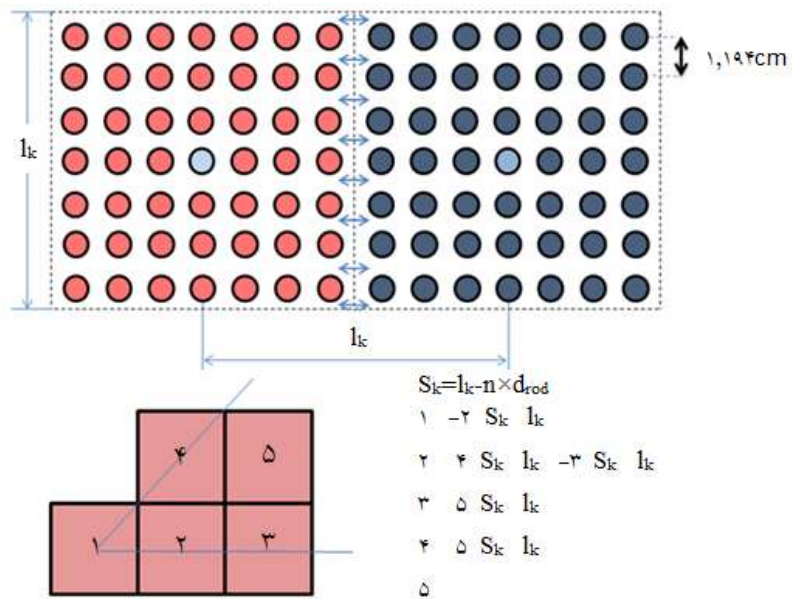
$$2 \quad 3 \quad s_1 = 244 \quad s_2 = 194 \quad 4 \quad s_1 = 244 \quad s_2 = 194$$

$$3 \quad 5 \quad s_1 = 244 \quad s_2 = 194$$

شکل ۳-۴. نحوه‌ی تعیین ارتباط بین کانال‌ها در روش تحلیل زیرکانال.



شکل ۳-۵. نحوه‌ی تعیین ارتباط بین کانال‌ها در روش تحلیل زیرکانال.



شکل ۳-۶. نحوه‌ی تعیین ارتباط بین کانال‌های مجاور در حالت تحلیل قلب رآکتور.

کارت ۸: ارتباط بین میله‌های سوخت و کانال‌ها (I3,3X, I3,3X,6(I3,E6.0))

کارت ۸ تنها برای حالت تحلیل زیرکانال مورد استفاده قرار می‌گیرد.

برای هر میله‌ی سوخت فقط یک سطر لازم است.

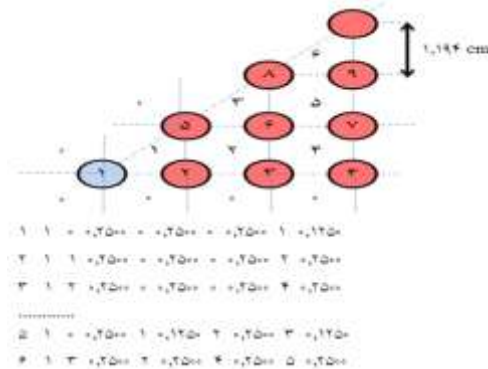
۸a: شماره‌ی میله‌ی سوخت

۸b: شماره‌ی نوع میله‌ی سوخت

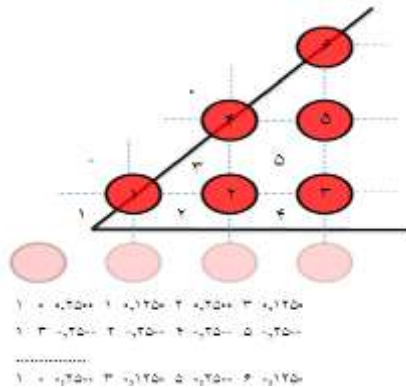
۸c: شماره‌ی کانال مجاور میله‌ی سوخت مورد نظر

۸d: کسر انرژی تولیدی در میله‌ی سوخت که به این کانال وارد می‌شود.

کارت‌های b ، c و d برای کانال‌های مجاور بعدی در ادامه سطر تکرار می‌شوند. توجه داشته باشید، برای میله‌هایی که روی خط تقارن مورب قرار دارند کسر انرژی ورودی به کانالی که روی خط تقارن مورب واقع شده یک‌هشتم است و برای چیدمان مربعی برای هر میله‌ی سوخت باید هر چهار کانال مجاور را تعیین کرد. بنابراین در مورد میله‌هایی که دقیقاً روی خطوط تقارن قرار گرفته‌اند باید کانالی فرضی با شماره‌ی صفر در نظر گرفته شود. نحوه‌ی ورود این کارت در شکل‌های ۳-۷ و ۳-۸ نشان داده شده است.



شکل ۳-۷. نحوه‌ی تعیین ارتباط بین میله‌ها و کانال‌ها و تقسیم حرارت میله‌ها بین کانال‌های مجاور.



شکل ۳-۸. نحوه‌ی تعیین ارتباط بین میله‌ها و کانال‌ها و تقسیم حرارت میله‌ها بین کانال‌های مجاور.

کارت ۹: کانال کنارگذر^۱ (12I6)

منظور از کانال کنارگذر، کانالی است که در برداشت حرارت از سوخت نقشی ندارد. زمانی استفاده می‌شود که بیش از یک کانال کنار گذر داشته باشیم عدد اول مربوط به تعداد کانال‌های سوخت مجاور و عدد دوم مربوط به کانال کنارگذر است که در کنار کانال‌های حاوی سوخت قرار دارد. این کارت زمانی فعال می‌شود که عدد اول در کارت ۲ صفر بوده و عدد سوم در کارت ۳ بزرگ‌تر از یک باشد.

کارت ۱۰: اطلاعات کانال‌ها

این کارت برای هر دو حالت زیرکانال و هم تحلیل قلب رآکتور تعریف می‌شود. برای هر نوع کانال باید این کارت تکرار شود. که شامل بخش‌های a ، b و c است.

$10a$: (I6, E6.0, 4E12.0, I6) شماره‌ی میله‌ی سوخت

(۱-۶): عدد مشخص‌کننده‌ی اصطکاک (پیش فرض ۱ و حداکثر ۴) برای تعیین مقدار ضریب اصطکاک.

(۷-۱۲): عددی است که در سه پارامتر بعدی ضرب می‌شود تا مقادیر مربوط به کانال مورد بررسی به‌دست آید. سه پارامتر بعدی مربوط به کانال‌های کامل است. ممکن است برخی از کانال‌ها روی خطوط تقارن واقع شده باشند. در این صورت، هر بخشی (نصف، ربع و غیره) از آن کانال که در محاسبات در نظر گرفته می‌شود با یک ضریبی در این کارت اعمال می‌شود. شکل ۳-۹ برای تحلیل حالت زیر کانال محیط خیس‌شده، گرم‌شده و سطح عبوری جریان را نشان می‌دهد.

(۱۳-۲۴): سطح عبور سیال از کانال

(۲۵-۳۶): محیط ترشده کانال

(۳۷-۴۸): محیط گرم‌شده کانال

(۴۹-۶۰): این پارامتر مختص تحلیل قلب است. تعداد میله‌های سوخت داخل مجتمع سوخت (کانال با پارامترهای ترموهیدرولیکی معادل)

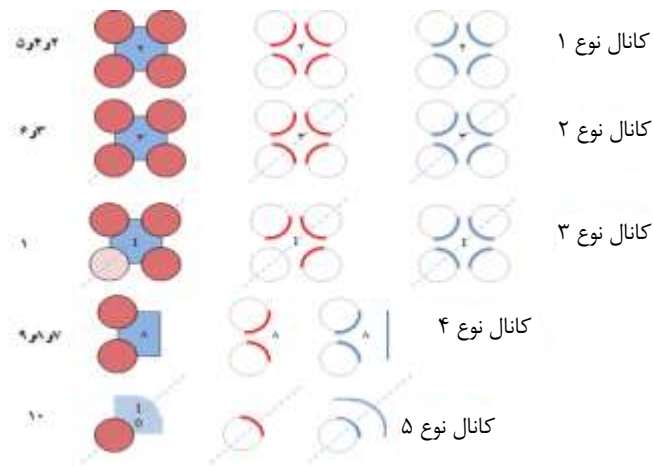
(۶۱-۶۶): این پارامتر مختص تحلیل قلب است (شماره‌ی نوع میله‌ی سوخت).

$10b$: (10E6.0) در صورتی این خط لازم است که در کارت ۳ وجود صفحه‌ی مشبک را مشخص

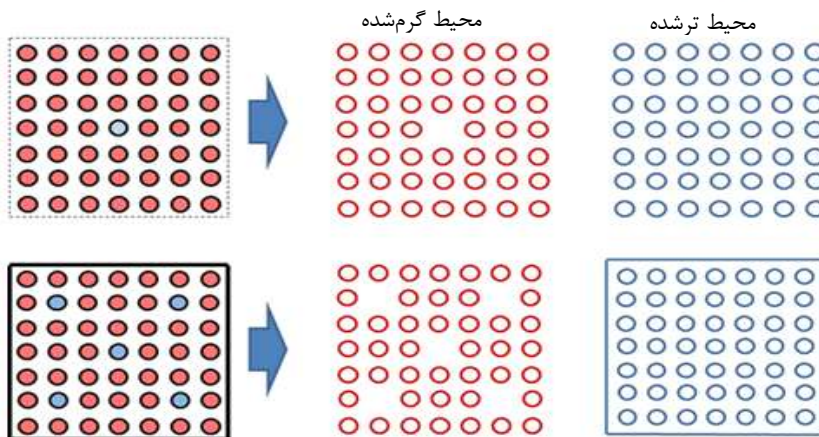
کرده باشیم. در این خط ضریب افت فشار انواع شبکه به ترتیب نوشته می‌شود.

1. By pass

۱۰c: (12I6) این قسمت مخصوص کانال‌هایی است که به نحوی با بقیه متفاوت هستند (کانال کامل نیستند یا سطح عبوری سیال و محیط ترشده و گرم‌شده متفاوتی دارند). در این کارت شماره‌های کانال‌ها وارد شود و در انتها یک عدد صفر وارد شود که نشان‌دهنده‌ی پایان ورودی است. به تعداد نوع کانال‌ها باید کارت ۱۰ از a تا c تکرار شود. شکل ۳-۱۰ برای تحلیل حالت قلب رآکتور، محیط خیس‌شده، گرم‌شده و سطح عبوری جریان را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۹. نحوه‌ی انتخاب انواع کانال و تعیین سطح عبوری، محیط ترشده و محیط گرم‌شده کانال‌ها.



شکل ۳-۱۰. نحوه‌ی تعیین سطح عبوری، محیط ترشده و گرم‌شده‌ی کانال‌ها در حالت تحلیل قلب رآکتور.

کارت ۱۱: موقعیت و نوع صفحه‌ی مشبک در طول کانال‌ها

در این کارت ابتدا موقعیت نسبی صفحات نگه‌دارنده (مشبک) از پایین قلب رآکتور بر حسب متر وارد می‌شود. سپس نوع صفحه تعیین می‌شود. برای مثال یک مجتمع سوخت که ۱۰ تا صفحه‌ی مشبک دارد و صفحات اولی و آخری نوع ۱، ۳ و صفحات مشبک میانی نوع دو هستند کارت‌های a ، b و a به صورت زیر تعریف خواهند می‌شوند.

\$ Card 10a
1 1.0 8.71125E-05 4.82768E-02 4.82768E-02 0
\$ Card 10b
0.6 0.4 0.7
\$ card 11
0.0714 2 0.2143 1 0.3571 1 0.5000 1 0.6429 1 0.7857 1
0.9286 3

کارت ۱۲: اطلاعات لازم برای مدل هدایت حرارتی سوخت

این کارت نیز شامل سه زیر بخش a ، b و c است.

۱۲a: (5E12.0)

(۱-۱۲): قطر قرص سوخت

(۱۳-۱۴): ضخامت غلاف

(۲۵-۳۶): چگالی سوخت

(۳۷-۴۸): چگالی غلاف

(۴۹-۶۰): قطر میله‌ی سوخت

(۶۱-۷۲): این پارامتر مربوط به نحوه‌ی توزیع توان تولیدی در سوخت است. اگر برابر صفر قرار

دهیم، کد توزیع توان را یکنواخت در نظر می‌گیرد.

۱۲b: (6E12.0)

(۱-۱۲): ضریب هدایت حرارتی سوخت

(۱۳-۱۴): ضریب گرمای ویژه سوخت

(۲۵-۳۶): ضریب هدایت حرارتی غلاف

(۳۷-۴۸): ضریب گرمای ویژه غلاف

(۴۹-۶۰): ضریب انتقال حرارت از قرص سوخت به غلاف

(۶۱-۷۲): کسر انرژی شکافت که مستقیماً در غلاف ظاهر می‌شود.

۱۲c: (2E12.0,6E6.0) این قسمت برای محاسبه‌ی ضریب انتقال حرارت از قرص سوخت به غلاف با استفاده از خواص گازهای داخل شکاف است.

کارت ۱۳: اطلاعات مدل گرمایش سوخت CRTN^۱ (10E6.0)

این کارت برای پارامترهای مورد نیاز مدل محاسبات حرارتی CRTN است که در کارت سه فعال می‌شود.

(۱-۶): قطر خارجی غلاف

(۷-۱۲): قطر داخلی غلاف

(۱۳-۱۸): قطر قرص سوخت

(۱۹-۲۴): ضخامت جرم‌گرفتگی (کثیفی)^۲

(۲۵-۳۰): ضخامت اکسید

(۳۱-۳۶): فاکتور برازش برای توزیع توان سوخت (پیش فرض 2 cm^{-1})

(۳۷-۴۲): رسانندگی غلاف

(۴۳-۴۸): رسانندگی کثیفی

(۴۹-۵۴): رسانندگی اکسید

(۵۵-۶۰): ضریب انتقال حرارت شکاف

کارت ۱۴: تعیین مدل هیدرولیکی (9I6)

انواع مدل‌های هیدرولیکی را کنترل می‌کند و بسیاری از کارت‌های بعدی را فعال یا غیرفعال می‌کند. سعی بر این است که همه‌ی کارت‌های فعال توضیح داده شود. اگر یک خط خالی برای این کارت در ورودی رها شود به منزله‌ی اعداد صفر برای تمام پارامترهای این کارت بوده و از یک روش پیش فرض برای مدل هیدرولیکی استفاده می‌کند و همه‌ی کارت‌های بعدی، تا کارت ۲۸ غیرفعال خواهد شد و باید کارت ۲۹ به بعد در ورودی کد وارد گردد.

$N(1-6)$: تعیین معادله‌ی جریان عرضی ناشی از تبادل آشفتگی در صورت انتخاب عدد صفر مدل پیش فرض انتخاب می‌شود و در غیر این صورت کارت ۱۵ جهت تعیین ضرایب a ، b و c فعال می‌گردد.

۱. محاسبات توزیع دمایی میله‌ی سوخت با این مدل فرض بر در نظر نگرفتن رسانندگی در راستای محوری و جانبی است.

2. Crud thickness

در شش پارامتر بعدی عدد یک برای فعال کردن و عدد صفر برای غیرفعال کردن گزینه‌های مربوطه بوده که در صورت فعال شدن، کارت‌های دیگری را برای جزییات مدل مربوطه باید در ورودی وارد کرد.

N2 (۷-۱۲): تعیین‌کننده‌ی مدل ضریب اصطکاک تک فاز. در صورت انتخاب عدد صفر مدل پیش فرض انتخاب می‌شود و در غیر این صورت کارت ۱۷ جهت تعیین جزییات مدل فعال می‌شود.

N3 (۱۳-۱۸): تعیین‌کننده‌ی مدل ضریب اصطکاک دو فاز. در صورت انتخاب عدد صفر مدل پیش فرض انتخاب می‌شود و در غیر این صورت کارت ۱۸ جهت تعیین جزییات مدل فعال می‌شود.

N4 (۱۹-۲۴): تعیین‌کننده‌ی مدل محاسبه‌ی بخار. در صورت انتخاب عدد صفر مدل پیش فرض انتخاب می‌شود و در غیر این صورت کارت ۲۰ جهت تعیین مدل فعال می‌شود.

N5 (۲۵-۳۰): تعیین نحوه‌ی توزیع دبی و اسیدبوریگ ورودی. در صورت انتخاب عدد صفر توزیع یکنواخت انتخاب می‌شود و در غیر این صورت کارت ۲۳ جهت نحوه‌ی تعیین توزیع فعال می‌شود. که می‌تواند کارت‌های ۲۴ و ۲۶ نیز فعال شود.

N6 (۳۱-۳۶): تعیین‌کننده‌ی مدل جریان عرضی. در صورت انتخاب عدد صفر مدل پیش فرض انتخاب می‌شود و در غیر این صورت کارت ۲۶ جهت تعیین جزییات مدل فعال می‌شود.

N7 (۳۷-۴۲): فعال‌کننده‌ی کارت ۲۷ برای معیارهای همگرایی پارامترهای ترموهیدرولیکی

N8 (۴۳-۴۸): تعیین‌کننده‌ی روش محاسبه‌ی خواص سیال. در صورت انتخاب عدد کم‌تر از صفر، از جدول آنتالپی کد استفاده می‌کند، در صورت انتخاب این عدد برابر صفر، جدولی استفاده نمی‌شود و مقادیر خواص به صورت صریح محاسبه می‌شوند. در صورت انتخاب این عدد بزرگ‌تر از صفر، جدولی با توجه به داده‌های ورودی کاربر در کارت ۲۸ تولید و استفاده می‌شود.

NHTC (۴۹-۵۴): تعیین‌کننده‌ی مدل انتقال حرارت جابه‌جایی از سطح

∞: مدل پیش فرض. انتقال حرارت تک فاز و معادلات تجربی استاندارد دیتوس بولتر.

۱: برای فعال کردن امکان انتخاب جابه‌جایی تک فاز و جوشش هسته‌ای (پوشش دادن منحنی جوشش قبل از نقطه‌ی شار حرارت بحرانی CHF). کارت ۲۲ فعال می‌شود.

۲: برای فعال کردن امکان انتخاب یک منحنی کامل جوشش. کارت ۲۲ فعال می‌شود.

ISAT (۵۵-۶۰): تعیین محل مرجع تعیین خواص آب

∞: محاسبه‌ی خواص بر اساس فشار خروجی سیستم

۱: محاسبه‌ی خواص بر اساس فشار در هر حجم کنترل

۲: محاسبه‌ی خواص بر اساس فشار در هر حجم کنترل در گام زمانی قبلی (برای مسایل گذرا)

نکته: اگر *ISAT* برابر ۱ یا ۲ انتخاب شود، باید پارامتر *N8* صفر انتخاب شود.

کارت ۱۵: مدل اختلاط (2E6.0, I6, E6.0)

در صورتی فعال می‌شود که N_1 در کارت ۱۴ صفر نباشد.

(۱-۶): تعیین ضریب a

(۷-۱۲): تعیین ضریب b

(۱۳-۱۸): اگر این پارامتر ≥ 1 انتخاب شود، ضریب اختلاط بخار مافوق گرم و دو فاز، مشابه با ضریب اختلاط مایع سرد، محاسبه می‌شود. اگر این پارامتر بزرگ‌تر از یک انتخاب شود، جدولی از ضرایب اختلاط در کارت ۱۶ داده می‌شود.

(۱۹-۲۴): ضریب هدایت حرارتی هندسی

کارت ۱۶: ضرایب اختلاط دو فاز (12E6.0)

در صورتی فعال می‌شود که پارامتر سوم کارت ۱۵ بزرگ‌تر از یک باشد.

به صورت اعداد دوتایی تا 3^0 عدد در ورودی داده می‌شود (شامل کیفیت مخلوط و ضریب اختلاط دو فاز).

کارت ۱۷: مدل اصطکاک تک فاز

اگر N_2 در کارت ۱۴ مخالف صفر باشد این کارت فعال می‌شود. خود این کارت شامل کارت‌های $17a$ ، $17b$ و $17c$ است.

$17a$: برای تصحیح ویسکوزیته‌ی دیواره (I6).

$17b$: تعیین ثوابت محاسبه‌ی ضریب افت فشار تک فاز برای جریان درهم (12E6.0).

$17c$: تعیین ثوابت محاسبه‌ی ضریب افت فشار تک فاز برای جریان آرام (12E6.0).

کارت ۱۸: مدل اصطکاک دوفاز (I6)

اگر N_3 در کارت ۱۴ صفر نباشد این کارت فعال می‌شود.

۱: معادله‌ی اپری (مدل پیش فرض)

۲: مدل هموژن

۳: مدل آرماند

۵: تابع چندجمله‌ای (در صورت انتخاب این گزینه کارت ۱۹ برای ضرایب تابع فعال می‌شود).

کارت ۱۹: این کارت برای استفاده از مدل چند جمله‌ای برای اصطکاک دو فاز است. در

این کارت درجه‌ی چندجمله‌ای (عدد اول) و ضرایب آن (عدد دوم) مشخص می‌شوند.

(I6,7E6.0)

کارت ۲۰: مدل کسر حجمی بخار (2I6)

اگر N_4 در کارت ۱۴ صفر نباشد این کارت فعال می‌شود.

(۱-۶): انتخاب معادله‌ی جوشش زیر اشباع
(۷-۱۲): انتخاب معادله‌ی بین کسر حجمی و کیفیت جرمی بخار
(۱۳-۱۸): انتخاب معادله‌ی ضریب لغزش (نسبت سرعت فاز بخار به فاز مایع) می‌تواند کارت ۲۱ را فعال کند.

کارت ۲۱: تخمین چندجمله‌ای برای نسبت لغزش و کسر حجمی (I6,7E6.0)
در این کارت درجه‌ی چندجمله‌ای (بیشینه درجه‌ی ۷) و ضرایب آن مشخص می‌شوند. مشابه کارت ۱۹ است. شامل دو بخش $21a$ و $21b$ است که ورودی‌های هر دوی این کارت‌ها مشابه هم هستند.

کارت ۲۲: مدل انتقال حرارت (6I6)
اگر NHTC در کارت ۱۴ مخالف صفر باشد این کارت فعال می‌شود.
(۱-۶): انتخاب معادله‌ی ضریب انتقال حرارت تک فاز
(۷-۱۲): انتخاب معادله‌ی ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای زیر اشباع
(۱۳-۱۸): انتخاب معادله‌ی ضریب انتقال حرارت جوشش هسته‌ای اشباع
(۱۹-۲۴): انتخاب معادله‌ی شار حرارت بحرانی
(۲۵-۳۰): انتخاب معادله‌ی ضریب انتقال حرارت در ناحیه‌ی جوشش گذرا
(۳۱-۳۶): انتخاب معادله‌ی ضریب انتقال حرارت در ناحیه‌ی جوشش فیلمی
کارت ۲۳: مدل توزیع دبی و اسیدبوریکی ورودی به کانال‌ها (2I6)
اگر $N5$ در کارت ۱۴ صفر نباشد این کارت فعال می‌شود.
(۱-۶): مربوط به توزیع دبی

°: شار جرمی یکسان برای ورودی همه‌ی کانال‌ها
۱: شار جرمی، با توجه به یکسان شدن افت فشار در همه‌ی کانال‌ها توسط کد تعیین می‌شود.
۲: توزیع شار به صورت نسبی در کارت ۲۴ توسط کاربر داده می‌شود.
(۷-۱۲): مربوط به توزیع اسید بوریکی
۱ و کم‌تر: اسید بوریکی یکسان برای ورودی همه‌ی کانال‌ها
۲: توزیع اسید بوریکی در کارت ۲۵ توسط کاربر داده می‌شود.
کارت ۲۴: توزیع دبی ورودی به کانال‌ها (12E6.0)
توزیع دبی به ترتیب شماره‌ی کانال‌ها به صورت نسبت شار جرمی ورودی هرکانال به شار جرمی متوسط داده می‌شود.

کارت ۲۵: در این کارت غلظت بور ورودی به صورت نسبت غلظت بور محلی به متوسط آن برای هر کانال وارد می‌شود. متوسط غلظت بور ورودی در کارت ۲۹ وارد می‌شود. (12E6.0)

کارت ۲۶: زمانی وارد می‌شود که N_6 در کارت ۱۴ صفر نباشد.

۲۶a: (4E6.0) در این کارت ضرایب مقاومت جریان عرضی، فاکتور تکانه‌ی اغتشاشی (نشان‌دهنده‌ی این است که آیا اغتشاش در انتقال تکانه‌ی عرضی اثرگذار باشد یا خیر) و زاویه‌ی کانال نسبت به محور عمودی وارد می‌شوند.

۲۶b: (3I6,E6.0,2I6,3E6.0) معادله‌ی مورد استفاده برای شار حرارتی بحرانی، توان بحرانی و ضریب افت فشار برای صفحات نگاه‌دارنده در این کارت وارد می‌شوند.

کارت ۲۷: در این کارت پارامترهای همگرایی از جمله بیشینه و کمینه تعداد تکرار خارجی وارد می‌شوند. (2I6,6E6.0, 2E6.0,I6)

(۱-۶): کمینه تعداد تکرارهای خارجی (پیش‌فرض ۲)

(۷-۱۲): بیشینه تعداد تکرارهای خارجی (پیش‌فرض ۲۰)

(۱۳-۱۸): مقدار خطای همگرایی برای فشار و جریان محوری در تکرارهای خارجی (پیش‌فرض

۰٫۰۰۱)

(۱۹-۲۴): مقدار خطای همگرایی برای جریان عرضی در تکرارهای خارجی (پیش‌فرض ۰٫۰۱)

(۲۵-۳۰): فاکتور میرایی برای اختلاف فشار جانبی (پیش‌فرض ۰٫۸)

(۳۱-۳۶): فاکتور میرایی برای جریان‌های محوری (پیش‌فرض ۰٫۸)

(۳۷-۴۲): معیار همگرایی برای ضریب انتقال حرارت میله‌ی سوخت (پیش‌فرض ۰٫۰۱)

(۴۳-۴۸): همگرایی مطلق توزیع دمایی میله‌ی سوخت (پیش‌فرض ۱-)

(۴۹-۵۴): بیشینه تعداد تکرارهای داخلی (پیش‌فرض ۱۰)

(۵۵-۶۰): بیشینه خطای مجاز معادله‌ی پیوستگی (پیش‌فرض ۰٫۰۰۱)

(۶۱-۶۶): معیار همگرایی برای تکرارهای داخلی فشار (پیش‌فرض ۰٫۰۰۱)

(۶۷-۷۲): اگر عدد چهارم در کارت شماره‌ی ۲، صفر باشد، عدد این کارت شماتیک تکرار گرادیان فشار را نشان می‌دهد (مقدار ۱)؛ اما اگر عدد چهارم در کارت شماره‌ی ۲، یک باشد، این عدد شماتیک تکرار نیوتن رافسون را نشان می‌دهد (مقدار ۲).

کارت ۲۸: مربوط به خصوصیات فیزیکی آب است. مثلاً بیشینه آنتالپی آب تا چه مقدار در نظر گرفته شود، توسط این کارت مشخص می‌شود. (2I6,2E12,0)

(۱-۶): تعداد نقاط برای وارد کردن جدول آنتالپی مایع سرد (کمینه تعداد ۲ و بیشینه تعداد ۳۰)
(۷-۱۲): تعداد نقاط برای وارد کردن جدول آنتالپی بخار فوق گرم (کمینه تعداد ۲ و بیشینه تعداد ۳۰)

(۱۳-۲۴): کمینه آنتالپی ورودی در جدول آنتالپی مایع سرد
(۲۵-۳۶): بیشینه آنتالپی ورودی در جدول آنتالپی بخار فوق گرم

کارت ۲۹: شرایط عملیاتی (I6,4E6.0,I6,6E6.0)

(۱-۶): روش تعیین آنتالپی ورودی

◦ آنتالپی ورودی یکسان برای همه‌ی کانال‌ها

۱: دمای ورودی یکسان برای همه‌ی کانال‌ها

۲: تعیین آنتالپی متفاوت برای هر کانال: کارت ۳۱ را فعال می‌کند.

۳: تعیین دمای ورودی متفاوت برای هر کانال (کارت ۳۱ را فعال می‌کند).

(۷-۱۲): مقدار آنتالپی یا دمای ورودی یکسان.

(۱۳-۱۸): مقدار متوسط دبی جرمی بر واحد سطح برای هر کانال

(۱۹-۲۴): فشار خروجی سیستم

(۲۵-۳۰): تعیین مدل جریان ورودی

◦ = از توزیع جریان ورودی در کارت‌های ۲۳ و ۲۴ استفاده می‌کند.

◦ < جریان جرمی ورودی به هر کانال پس از یک تکرار خارجی مجدداً بر اساس یک افت فشار یکنواخت در همه‌ی کانال‌ها توسط کد محاسبه می‌شود.

(۳۱-۳۶): اگر مقدار این پارامتر غیرصفر باشد کد از الگوی افت فشار غیریکنواخت بهره می‌برد.

(۳۷-۴۲): فاکتور توان: ضریبی که در توزیع توان (کارت ۵) ضرب می‌شود. اگر صفر قرار دهیم از مقدار پیش فرض یک استفاده می‌شود.

(۴۳-۴۸): کسری از انرژی حاصل از شکافت که مستقیماً در سیال ظاهر می‌شود.

(۴۹-۵۴): مقدار متوسط دبی جرمی بر واحد سطح برای کانال‌های کنارگذر

(۵۵-۶۰): غلظت اسید بوریک به ppm

(۶۱-۶۶): کسر حرارت نشت کرده از میله‌ی سوخت به داخل کانال.

(۶۷-۷۲): آنتالپی خروجی.

کارت ۳۰: شامل دو بخش است:

۳۰a: (E6.0, I6) اطلاعات مربوط به زمان

(۱-۶): (برای مسایل پایا عدد صفر)، انتهای بازه‌ی زمان گذرا (ثانیه)

(۷-۱۲): تعداد بازه‌های زمانی گذرا

۳۰b: (4E6.0, I6, E6.0) اگر پارامتر دوم 3^0a بزرگ‌تر از صفر باشد 3^0b فعال می‌شود.

(۱-۶): اندازه‌ی گام زمانی برای بازه‌ی زمانی اول

(۷-۱۲): تعداد چاپ نتایج در گام زمانی اگر برابر صفر باشد نتایج در پایان هر گام زمانی چاپ می‌شود.

(۱۳-۱۸): پایان گام زمانی اول

برای گام‌های زمانی بعدی نیز به همین صورت این سه پارامتر نوشته می‌شود.

کارت ۳۱: برای توزیع دما و آنتالپی ورودی است (12E6.0)

کارت ۳۲: پارامترهای گذرا (5I6)

(۱-۶): تعداد نقاط زمانی که در آن تابع تعیین‌کننده‌ی تغییرات فشار در آن نقاط داده می‌شود.

(حداکثر 3^0 نقطه) اگر این مقدار کم‌تر یا برابر یک انتخاب شود از کارت ۳۳ استفاده نمی‌شود.

(۷-۱۲): این پارامتر خالی گذاشته می‌شود.

(۱۳-۱۸): این پارامتر خالی گذاشته می‌شود.

(۱۹-۲۴): تعداد نقاط زمانی که تابع تعیین‌کننده‌ی تغییرات توان در آن نقاط داده می‌شود (حداکثر

3^0 نقطه). اگر این مقدار کم‌تر یا برابر یک انتخاب شود از کارت ۳۴ استفاده نمی‌شود.

(۲۵-۳۰): تعداد نقاط زمانی که در آن تابع تعیین‌کننده‌ی تغییرات دما یا آنتالپی ورودی، دبی ورودی

و غلظت اسید بوریک در آن نقاط داده خواهد شد (حداکثر 1^0 نقطه) اگر این مقدار صفر انتخاب شود از کارت ۳۵ استفاده نمی‌شود.

کارت ۳۳: تابع تعیین‌کننده‌ی شرایط گذرای فشار سیستم (12E6.0)

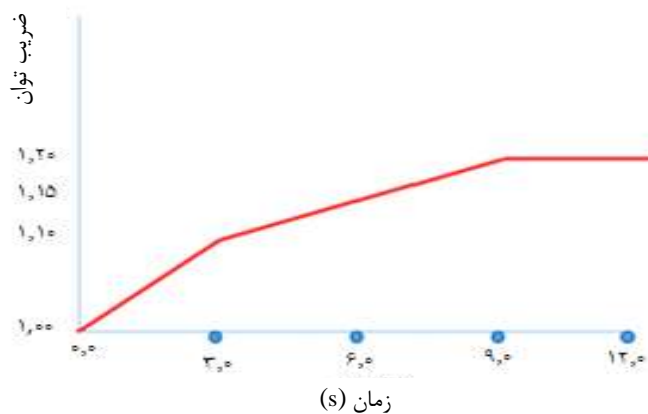
این کارت به صورت زوج مرتب فشار و زمان داده می‌شود. فشار به صورت نسبت فشار در هر زمان به فشار شرایط پایا است.

کارت ۳۴: تابع تعیین‌کننده‌ی شرایط گذرای توان سیستم (12E6.0)

این کارت به صورت زوج مرتب توان و زمان داده می‌شود. توان به صورت نسبت توان در هر زمان به توان شرایط پایا می‌باشد. چنان‌چه منحنی تغییرات توان طی ۹ ثانیه به صورت شکل ۳-۱۱ باشد،

کارت 3^0 تا ۳۴ را می‌توان به صورت زیر نوشت.

\$ Card 30a
 0 9.0 3
 \$ Card 30b
 .01 100 3.0 .01 100 6.0 .01 100 9.0
 \$ card 32
 0 0 0 5 0
 \$ card 34
 10 1.2 9.0 1.2 1.15 6.0 3.0 1.1 0.0 1.0



شکل ۳-۱۱. منحنی تغییر توان رآکتور فرضی بر حسب زمان.

کارت ۳۵: تابع تعیین کننده شرایط گذرا

کارت مربوط به پارامترهای ورودی کانال‌ها (برای هر نوع پارامتر باید کارت ۳۵ تکرار شود) هستند که شامل کارت‌های ۳۵a، ۳۵b، ۳۵c، ۳۵d، ۳۵e و ۳۵f است.

۳۵a: (I6) تعیین تعداد نقاط زمانی برای آنتالپی ورودی (بیشینه ۳۰ نقطه‌ی زمانی)

۳۵b: (12E6.0) در این کارت توزیع آنتالپی به صورت عدد دوتایی و با فاصله وارد می‌شود که عدد اول نشان‌دهنده‌ی زمان و عدد دوم نشان‌دهنده‌ی نسبت میزان آنتالپی در حالت گذرا به میزان آنتالپی در حالت پایا است.

۳۵c: (I6) تعیین تعداد نقاط زمانی برای جریان ورودی (بیشینه ۳۰ نقطه‌ی زمانی)

۳۵d: (12E6.0) در این کارت توزیع جریان ورودی به صورت عدد دوتایی و با فاصله وارد می‌شود که عدد اول نشان‌دهنده‌ی زمان و عدد دوم نشان‌دهنده‌ی نسبت میزان جریان ورودی در حالت گذرا به میزان جریان ورودی در حالت پایا است.

۳۵e: (I6) تعیین تعداد نقاط زمانی برای غلظت بور (بیشینه ۳۰ نقطه‌ی زمانی)

۳۵f: (12E6.0) در این کارت توزیع غلظت بور به صورت عدد دوتایی و با فاصله وارد می‌شود که عدد اول نشان‌دهنده‌ی زمان و عدد دوم نشان‌دهنده‌ی نسبت میزان غلظت بور در حالت گذرا به میزان غلظت بور در حالت پایا است.

کارت ۳۶: کنترل خروجی کد (7I6)

(۱-۶): تعیین پرینت محوری

(۷-۱۲): برای مسایل گذرا

(۱۳-۱۸):

° نتایج کانال‌ها

۱: نتایج کانال‌ها و جریان‌های عرضی

۲: نتایج کانال‌ها و میله‌های سوخت

۳: نتایج کانال‌ها و میله‌های سوخت و جریان‌های عرضی

(۱۹-۲۴):

° = نتایج همه‌ی کانال‌ها

° < نتایج کانال‌هایی که شماره‌ی آن‌ها در کارت ۳۷ آمده است.

(۲۵-۳۰):

° = نتایج همه‌ی میله‌ها

° < نتایج میله‌هایی که شماره‌ی آن‌ها در کارت ۳۸ آمده است.

کارت ۳۷: برای پرینت اطلاعات کانال‌هایی که شماره‌ی آن‌ها در این کارت ذکر می‌شود، استفاده می‌شود. (12I6)

کارت ۳۸: برای پرینت اطلاعات میله‌هایی که شماره‌ی آن‌ها در این کارت ذکر می‌شود، استفاده می‌شود. (12I6)

کارت ۳۹: برای چاپ اطلاعات گره‌های شعاعی سوخت که با توجه به نوع مدل CRTN، TWIGL و غیره تعیین می‌شوند. (12I6)

۳-۳ خلاصه و جمع‌بندی مطالب فصل

در این فصل با نحوه‌ی نوشتن ورودی برای کد آشنا شدیم. همان‌طور که گفته شد ورودی کد شامل کارت ۳۹ است و هر کارت در یک سطر مجزا و با فرمت خاص باید وارد شود. با توجه به مسئله‌ی مورد بررسی کارت‌ها را می‌توان در ورودی کد وارد نکرد. در ادامه در فصل چهارم، با ارایه‌ی مثال‌هایی با نحوه‌ی نوشتن ورودی و تحلیل نتایج خروجی آشنا خواهیم شد.

٣-٤ مراجع

1. COBRA-EN Code System for Thermal-Hydraulic Transient Analysis of Light Water Reactor Fuel Assemblies and Cores Contributed/ENEL SpA, Milano, Italy through the Nuclear Energy Agency Data Bank, Issy-les-Moulineaux.

فصل چهارم: مسایل حل شده با کد COBRA-EN

برای فهم این کد مثال‌های برای تثبیت یادگیری خوانندگان آورده شده است. هدف این است که با مطالعه‌ی این مسایل خواننده قادر باشد ورودی متناسبی با موضوعی که مایل به بررسی آن است بنویسد و خروجی کد و نتیجه آن را تحلیل کند. تلاش شده مثال‌هایی بررسی شوند که بتواند همه‌ی مطالبی را که در فصل‌های قبل ارایه شدند کاملاً پوشش دهد. همچنین سعی شده است در هر مثال خطاهایی که در ورودی کد ممکن است ایجاد شود، توضیح داده شود. همواره در خروجی کد دو نکته‌ی مهم وجود دارند. این نکات مربوط به یافتن میله‌ی داغ و کانال داغ هستند. میله‌ی سوختی که در بین میله‌ها بالاترین دما را داشته باشد میله‌ی داغ است (بالاترین توان را دارد). باید توزیع دما (که در ادامه نحوه‌ی توزیع دما توضیح داده شده است) در همه‌ی میله‌ها را بررسی و میله‌ی داغ را بیابیم. به داده‌های خروجی یک میله در شکل ۴-۱ توجه شود. شماره‌ی میله‌ی سوخت در ابتدا آمده است. توزیع دما به صورت شعاعی و در ارتفاع‌های مختلف از پایین میله‌ی سوخت به سمت بالای میله (که با کلمه‌ی Distance مشخص شده است) آمده است. در این مثال مقادیر $T(1)$ تا $T(5)$ مربوط به سوخت و $T(6)$ تا $T(7)$ دمای سطح داخلی و خارجی غلاف است. مقدار $T(1)$ دمای مرکز سوخت و $T(5)$ دمای سطح سوخت است.

TIME = 0.00000 SEC - TEMPERATURE DATA FOR ROD 2 (FUEL TYPE 1)

DISTANCE (M)	FLUX (MW/M2)	DNBR	CHANNEL	AV FUEL T (DEG-K)	TEMPERATURE						
					T (1)	T (2)	T (3)	T (4)	T (5)	T (6)	T (7)
0.050	0.61560	0.000	0	956.4	1181.5	1134.2	1035.3	898.3	740.4	612.9	584.1
0.150	0.61560	0.000	0	957.2	1182.4	1135.1	1036.2	899.1	741.0	613.6	584.7
0.250	0.61560	0.000	0	958.0	1183.4	1136.0	1037.0	899.9	741.7	614.2	585.4
0.350	0.61560	0.000	0	958.8	1184.4	1136.9	1037.9	900.6	742.3	614.9	586.1
0.450	0.61560	0.000	0	959.6	1185.3	1137.9	1038.7	901.4	743.0	615.6	586.7
0.550	0.61560	0.000	0	960.4	1186.2	1138.8	1039.6	902.1	743.6	616.2	587.4
0.650	0.61560	0.000	0	961.2	1187.2	1139.7	1040.4	902.9	744.3	616.8	588.1
0.750	0.61560	0.000	0	962.0	1188.1	1140.6	1041.3	903.7	744.9	617.5	588.7
0.850	0.61560	0.000	0	962.8	1189.1	1141.5	1042.1	904.4	745.6	618.1	589.4
0.950	0.61560	0.000	0	963.6	1190.0	1142.4	1042.9	905.2	746.2	618.8	590.0
1.050	0.61560	0.000	0	964.4	1190.9	1143.3	1043.8	905.9	746.9	619.4	590.7
1.150	0.61560	0.000	0	965.1	1191.8	1144.2	1044.6	906.6	747.5	620.1	591.4
1.250	0.61560	0.000	0	965.9	1192.8	1145.1	1045.5	907.4	748.1	620.7	592.0
1.350	0.61560	0.000	0	966.7	1193.7	1146.0	1046.3	908.1	748.8	621.3	592.7
1.450	0.61560	0.000	0	967.5	1194.6	1146.9	1047.1	908.9	749.4	622.0	593.3
1.550	0.61560	0.000	0	968.3	1195.5	1147.8	1047.9	909.6	750.1	622.6	594.0
1.650	0.61560	0.000	0	969.0	1196.5	1148.7	1048.8	910.4	750.7	623.2	594.6
1.750	0.61560	0.000	0	969.8	1197.4	1149.5	1049.6	911.1	751.3	623.9	595.2
1.850	0.61560	0.000	0	970.6	1198.3	1150.4	1050.4	911.8	751.9	624.5	595.9
1.950	0.61560	0.000	0	971.3	1199.2	1151.3	1051.2	912.5	752.6	625.1	596.6

شکل ۴-۱. داده‌های خروجی یک میله.

مختصات گره‌های شعاعی در سوخت نیز برای ترسیم لازم است که در خروجی کد ارائه نشده است و کافی است با توجه به شعاع قرص سوخت و شعاع داخلی و خارجی غلاف، محل سایر گره‌ها را محاسبه و استفاده کنیم. محل گره در مرکز حجم المان‌ها است. آخرین گره در سطح قرص سوخت انتخاب می‌شود. ضخامت المان‌ها باید یکسان باشند. در شکل ۴-۱، مقادیر DNBR (نسبت انحراف از جوشش هسته‌ای) صفر نشان داده شده است. پیش فرض کد بر آن است در صورتی که مقدار DNBR بیش‌تر از ۱۰ باشد عدد صفر در خروجی چاپ می‌کند. در فایل خروجی برنامه، در یک بخش خلاصه‌ی پارامترهای خروجی همه‌ی کانال‌ها در کنار هم آورده می‌شود. شکل ۴-۲، پارامترهای خروجی برای همه‌ی کانال‌ها در خروجی کد را نشان می‌دهد. کانالی که بیش‌ترین دما یا آنتالپی خروجی را داشته باشد، کانال داغ است. قسمت آبی رنگ کانال داغ را نشان می‌دهد.

TIME = 0.00000 SEC - CHANNEL EXIT SUMMARY RESULTS

MASS BALANCE -- (KG/SEC)		ENERGY BALANCE -- (MW)		BORON MASS BALANCE -- (KG/SEC)	
MASS FLOW IN	2.20901	ENERGY FLOW IN	2.84970	BORON FLOW IN	0.00000
MASS FLOW OUT	2.20901	ENERGY FLOW OUT	3.01602	BORON FLOW OUT	0.00000
MASS STORED	0.00000	ENERGY STORED	0.00000	BORON STORED	0.00000
MASS FLOW ERROR	0.00000	ENERGY ERROR	0.00000	BORON MASS ERROR	0.00000

CHANNEL NO.	DELTA-P (KPA)	ENTHALPY (MJ/KG)	TEMPERATURE (DEG-K)	DENSITY (KG/M3)	FLOWING QUALITY	VOID FRACTION	FLOW (KG/SEC)	MASS FLUX (KG/M2/SEC)	BORON (PPM)
1	32.54	1.3683	578.66	715.97	0.00000	0.00000	0.14725	2717.44995	0.0
2	32.54	1.3672	578.47	716.41	0.00000	0.00000	0.30426	3296.03589	0.0
3	32.54	1.3637	577.85	717.87	0.00000	0.00000	0.14731	2718.65771	0.0
4	32.54	1.3672	578.47	716.41	0.00000	0.00000	0.30426	3296.03589	0.0
5	32.54	1.3704	579.10	715.09	0.00000	0.00000	0.40219	3536.37476	0.0
6	32.54	1.3617	577.50	718.70	0.00000	0.00000	0.30452	3300.84839	0.0
7	32.54	1.3637	577.85	717.87	0.00000	0.00000	0.14731	2718.65771	0.0
8	32.54	1.3617	577.50	718.70	0.00000	0.00000	0.30452	3300.84839	0.0
9	32.54	1.3591	577.04	719.75	0.00000	0.00000	0.14738	2719.83521	0.0

شکل ۴-۲. خلاصه‌ی پارامترهای خروجی همه‌ی کانال‌ها در خروجی کد.

۴-۱ مسایل کاربردی

در این بخش مثال‌هایی کاربردی شرح داده می‌شود تا خواننده با نحوه‌ی نوشتن ورودی و تحلیل خروجی با کد آشنا شود.

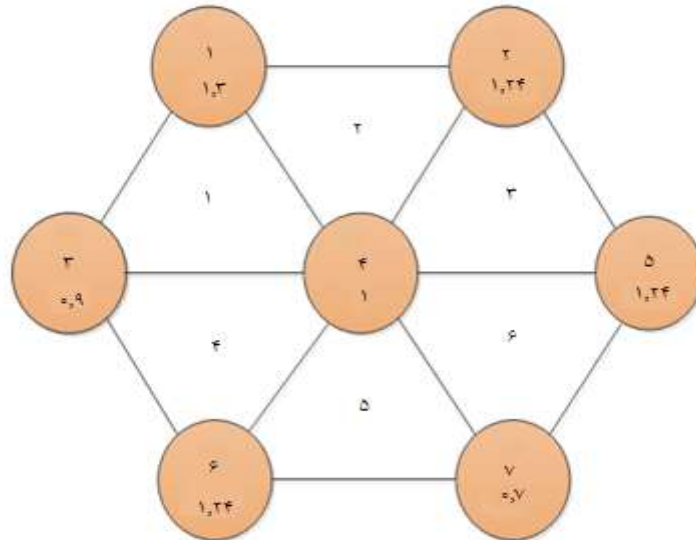
مثال ۴-۱. فرض کنید مشخصات ترموهیدرولیکی قلب رآکتور و مشخصات هندسی میله‌ها و کانال‌ها در جدول ۴-۱ و شکل ۴-۳ داده شده است. با توجه به آرایش میله‌های سوخت نشان داده شده در شکل ۴-۳، پاسخ سوالات مطرح شده را به کمک مدل‌سازی با کد COBRA-EN به دست آورید.

الف) تغییرات چگالی و دمایی سیال را برای کانال گرم ترسیم کنید.

ب) توزیع شعاعی دما را برای میله‌ی سوخت گرم ترسیم کنید.

جدول ۴-۱. اطلاعات اولیه‌ی مسئله‌ی ۴-۱.

پارامتر	مقدار
قطر میله‌ی سوخت	۹٫۲ mm
گام میله	۱۳ mm
ارتفاع فعال میله‌ی سوخت	۴ m
قطر قرص سوخت	۷٫۵۶ mm
ضخامت غلاف	۰٫۷ mm
فشار سیستم	۱۵٫۷ MPa
توان متوسط خطی میله‌ی سوخت	۱۷۳٫۴ W/cm
شار گرمی سیال	۴۰۰۰ kg/m ^۳ s
درجه حرارت سیال ورودی	۲۹۱ °C
ضریب انتقال حرارت بین سوخت و غلاف	۵۲۰۰ W/m ^۲ K



شکل ۴-۳. آرایش میله‌های سوخت به همراه مقادیر توان نسبی و شماره‌ی کانال‌ها و میله‌ها.

شیوه‌ی شماره‌گذاری میله‌ها (به رنگ قهوه‌ای) و کانال‌ها کاملاً اختیاری است. با توجه به آرایش میله‌ها و کانال‌ها، همه‌ی کانال‌ها (از یک تا شش) شرایط هندسی مشابهی دارند لذا سطح عبوری جریان و محیط ترشده و گرم‌شده برای همه‌ی کانال‌ها یکسان است. با توجه به کارت ۱۲ می‌توان مقادیر سطح عبوری جریان، محیط ترشده و گرم‌شده را به صورت زیر محاسبه کرد:

سطح عبوری جریان:

$$\text{مساحت هر میله ی سوخت} - \text{مساحت هر کانال مثلثی} = \text{سطح عبوری جریان} \times 0.5 = 3994 \text{ mm}^2$$

محیط ترشده:

$$3 \times 14.45 \text{ mm} = \text{محیط ترشده ی هر میله ی سوخت} = \text{محیط ترشده}$$

محیط گرم شده:

$$3 \times 14.45 \text{ mm} = \text{محیط گرم شده ی هر میله ی سوخت} = \text{محیط گرم شده}$$

بعد از محاسبه ی این پارامترها نوبت به نوشتن فایل ورودی می رسد.

subchannel analysis, 7 fuel rod, 6 channels

\$ card 2

1 2 2 1

\$ card 3

1 6 7 10 1 0 0 5 0 0 0 1

\$ card 4

-0.4000

\$ card 5 format for power 6E12.5

10

0.2

\$-----+++++++-----+++++++-----

+++++++

22542 21501.6 15606 17340 21501.6 21501.6

12138

0.6

22542 21501.6 15606 17340 21501.6 21501.6

12138

1.00

22542 21501.6 15606 17340 21501.6 21501.6

12138

1.40

22542 21501.6 15606 17340 21501.6 21501.6

12138

1.80

22542 21501.6 15606 17340 21501.6 21501.6

12138

2.20

22542 21501.6 15606 17340 21501.6 21501.6

12138

2.60

22542 21501.6 15606 17340 21501.6 21501.6

\$iiii-----+++++-----+++++iiii-----+++++-----+++++-----+++++

1564.15 4000. 15.7 0.0 0 0.0 0.00 0.0000.0 0.0 0.0

\$ card 30

0

\$ card 32

0

\$ card 36

0 0 3 6 7 0 0

\$ card 37

1 2 3 4 5 6

\$ card 38

1 2 3 4 5 6 7

خط اول مربوط به توضیحات کار انجام شده است و اختیاری است. در کارت دو، عدد اول، نشان‌دهنده‌ی نوع مدل‌سازی، عدد دوم و سوم به ترتیب مشخص‌کننده‌ی واحد اطلاعات ورودی و خروجی در سیستم SI و عدد چهارم تحلیل ترموهیدرولیکی چهار معادله‌ای را نشان می‌دهد (می‌توان از مدل‌های دیگری نیز استفاده کرد). در کارت سه، عدد اول نشان‌دهنده‌ی این است که کانال‌ها باز هستند. بقیه‌ی اعداد نیز در قسمت کارت‌ها در فصل سه شرح داده شده است. در کارت چهار با توجه به این‌که ده گره با فاصله‌ی مساوی در این مسئله فرض کرده‌ایم و ارتفاع فعال سوخت چهار متر است لذا فاصله‌ی گره‌ها از هم 0.4 بدست می‌آید. در کارت 10 ، مختصات نقاط وسط هر المان را می‌گذاریم. برای المان اول ارتفاع از صفر تا 0.4 است لذا مرکز این مقدار 0.2 خواهد بود که در ورودی و در قسمت مربوطه لحاظ شده است. برای گره‌های بعدی نیز این مقدار حساب می‌شود. مثلاً برای المان دوم تغییرات ارتفاع از 0.4 تا 0.8 است که مختصات مرکز 0.6 می‌شود و در ورودی نوشته می‌شود. بعد از تعریف هر گره باید توان هر المان محاسبه و در کد وارد شود. در این مثال توان در همه‌ی میله‌ها یکسان نیست و مقادیر فاکتور قله‌ی توان داده شده است. باید توان برای هر میله در هر المان محاسبه شود. با توجه به این‌که توان یکنواخت در طول هر میله داریم لذا توان محاسبه شده برای المان اول در هر میله، همان مقدار توان محاسبه شده برای المان‌های بعدی در هر میله‌ی سوخت است که در ورودی کد مشاهده می‌شود.

نحوه‌ی محاسبه‌ی توان هر المان:

توان متوسط خطی هر میله‌ی سوخت \times فاکتور قله‌ی توان = توان میله‌ی سوخت

مثلاً برای میله‌ی سوخت شماره یک داریم:

متوسط خطی هر میله‌ی سوخت \times فاکتور قله‌ی توان = توان المان اول میله‌ی یک

$$1.3 \times 17340 = 2150.16$$

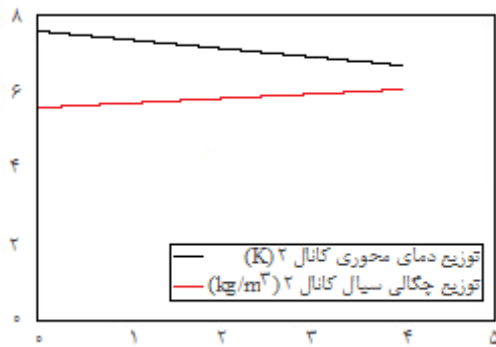
در کارت بعدی ارتباط بین کانال‌ها با هم و هم‌چنین طول همسایگی و فاصله‌ی مرکز تا مرکز هر کانال با کانال مجاورش وارد می‌شود. در صورتی‌که برای ارتباط یک کانال (مثلاً کانال یک با دو) در خط کانال یک، تعریف شود دیگر لازم نیست در تعریف کانال دو ارتباط بین کانال دو با کانال یک دوباره تکرار شود. مثلاً برای کانال شماره‌ی یک که با توجه به شکل ۴-۳ با کانال دو و چهار همسایه است، طول همسایگی کانال شماره‌ی یک با دو ($3/8 = 9/2 - 13$) و فاصله‌ی مرکز تا مرکز این دو کانال $0/13$ m است. میله‌ی سوخت شماره یک که با کانال‌های دو و یک در ارتباط است و این‌که چه کسری از توان میله وارد این کانال‌ها می‌شود در کارت شماره‌ی هشت وارد می‌شود. با توجه به این‌که یک ششم میله در ارتباط با کانال شماره‌ی یک و یک ششم میله در ارتباط با کانال شماره‌ی دو است پس $0/167$ از توان تولیدی در میله‌ی سوخت وارد این کانال‌ها می‌شود. در کارت ۱۰ اطلاعات نوع کانال مشخص شده تعیین می‌شود. در این کارت سطح عبور جریان، محیط ترشده و محیط گرم‌شده وارد می‌شوند که در بالا محاسبه شده‌اند. عدد دوم در این مثال با توجه به کامل بودن کانال و این‌که روی خط تقارن نیست، یک انتخاب شده است. در کارت ۱۲ اطلاعات نوع سوخت و شرایط هندسی آن با توجه به صورت مسئله وارد می‌شوند. کارت‌های ۱۴، ۲۲ و ۲۷ که با توجه به نوع مدل‌سازی تعیین می‌شوند. در این‌جا از این مقادیر و با توجه به دستورالعمل کد به صورت اختیاری استفاده شده است. در کارت ۲۹، فشار، دمای ورودی سیال و دبی جرمی سیال وارد می‌شوند. با توجه به پایا بودن مسئله، عدد صفر در کارت شماره‌ی ۳۰ استفاده شده است. کارت ۳۶ به بعد با توجه به اطلاعات خروجی مورد نیاز وارد می‌شوند. در این مسئله ۶ کانال و ۷ میله‌ی سوخت وجود دارد. در خروجی اطلاعات همه‌ی این میله‌ها و کانال‌ها خواسته شده است.

خروجی برنامه:

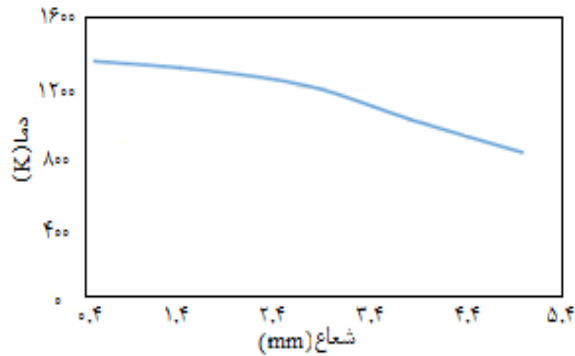
با توجه به حجم زیاد اطلاعات خروجی، در این قسمت اطلاعات مطلوب خواسته شده در صورت مسئله آورده شده است. با توجه به اطلاعات خروجی و ضریب قله‌ی توان زیاد میله‌ی سوخت شماره‌ی یک، این میله‌ی سوخت داغ‌ترین میله است. کانال شماره‌ی ۲ از بقیه‌ی کانال‌ها گرم‌تر و کانال داغ است.

الف) شکل ۴-۴ توزیع دما و چگالی خواسته شده در صورت مسئله را نشان می‌دهد.

ب) شکل ۴-۵ نیز توزیع دمای میله‌ی سوخت شماره‌ی ۱ را بر حسب شعاع میله نشان می‌دهد.



شکل ۴-۴. توزیع دمایی و چگالی سیال بر حسب ارتفاع مجتمع سوخت گرم.



شکل ۴-۵. توزیع دمایی میله‌ی سوخت یک بر حسب شعاع میله.

خطاهای رایجی که ممکن است کاربر با آن مواجه شود:

(۱) رعایت نکردن فرمت‌بندی ورودی.

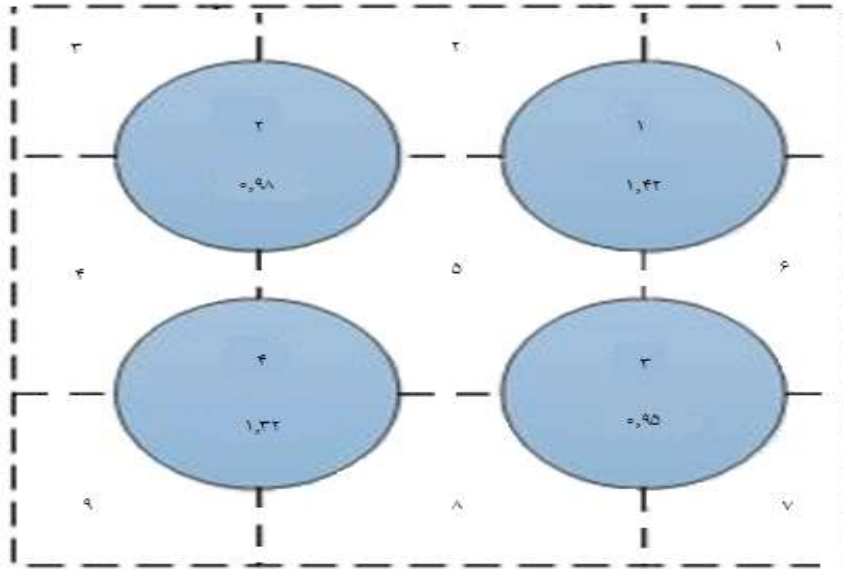
(۲) رعایت نکردن ترتیب کارت‌ها.

مثال ۴-۲. شکل ۴-۶ مقطع یک مجتمع سوخت و نحوه‌ی چیدمان میله‌های سوخت را نشان

می‌دهد. مطلوب است مدل‌سازی ترموهیدرولیکی با روش زیرکانال برای دو حالت زیر:

الف) نمودار توزیع دمایی سطح خارجی غلاف را برای هر چهار میله در راستای محوری ترسیم کنید.

ب) تغییرات چگالی خنک‌کننده را برای کانال ۵ بر حسب ارتفاع کانال ترسیم کنید.



شکل ۴-۶. مقطع یک مجتمع سوخت.

توجه شود که دیواره‌ی دور مجتمع فرضی می‌باشد و در محاسبه‌ی محیط ترشونده در نظر گرفته نمی‌شود. اطلاعات اولیه‌ی مسئله در جدول ۲-۴ ذکر شده است.

جدول ۲-۴. اطلاعات اولیه‌ی مثال ۲-۴.

مقدار	پارامتر
۱۳,۳۰ mm	قطر میله‌ی سوخت
۱۶,۳۹۷ mm	فاصله‌ی مرکز میله‌ها از یکدیگر
۹,۶۲۴ mm	فاصله‌ی میله‌ها تا دیواره‌ی فرضی
۲ m	ارتفاع فعال سوخت
۱۱,۶۵ mm	قطر قرص سوخت
۰,۷ mm	ضخامت غلاف
۱۵,۷ MPa	فشار سیستم
۲۰۶۰۰ W/m	توان متوسط خطی میله‌ی سوخت
۳۰۶۰ kg/m ^۳ s	شار جرمی سیال
۲۹۱,۴ °C	دمای سیال ورودی
۴۸۵۰ W/m ^۲ K	رسانندگی حرارتی شکاف

ورودی برنامه:

در این مدل سازی سه نوع کانال داریم. اگر شماره گذاری زیر را در نظر بگیریم کانال های ۲، ۴، ۶ و ۸ یک نوع کانال، کانال ۵ نوع دیگری از کانال و کانال های ۱، ۳، ۷ و ۹ نیز نوع دیگری از کانال هستند که محیط خیس و گرم شده و سطح عبور جریان متفاوتی دارند. توان یکنواخت فرض شده است.

محاسبه ی توان برای میله ها در هر گره:

متوسط توان خطی × فاکتور قله ی توان = توان در هر گره

Subchannel Analysis ,4 Fuel Rods , 9 CHANNELS,

\$ card 2

1 2 2 1

\$ card 3

1 9 4 10 3 0 0 5 0 0 0 1

\$ card 4

-0.35

\$ card 5

10

0.175

29252.0 20188.0 19570.0 27192.0

0.525

29252.0 20188.0 19570.0 27192.0

0.875

29252.0 20188.0 19570.0 27192.0

1.225

29252.0 20188.0 19570.0 27192.0

1.575

29252.0 20188.0 19570.0 27192.0

1.925

29252.0 20188.0 19570.0 27192.0

2.275

29252.0 20188.0 19570.0 27192.0

2.625

29252.0 20188.0 19570.0 27192.0

2.975

29252.0 20188.0 19570.0 27192.0

3.325

29252.0 20188.0 19570.0 27192.0

\$ card 7

1 2.00530.01417 6.00530.01417

2 3.00530.01417 5.00310.01417

3 4.00530.01417

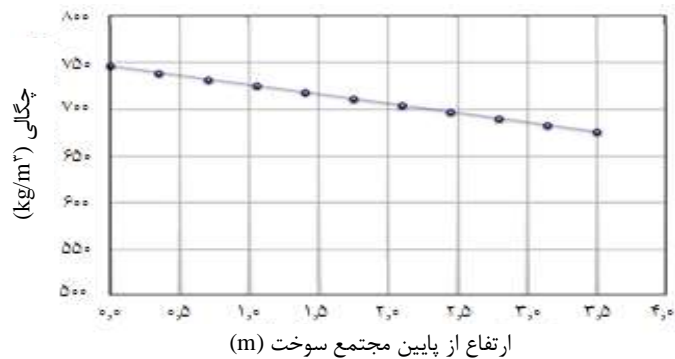
```

4 5.00310.01417 9.00530.01417
5 6.00310.01417 8.00310.01417
6 7.00530.01417
7 8.00530.01417
8 9.00530.01417
9
00 00
$ card 8
1 1 1 .2500 2 .2500 5 .2500 6 .2500
2 1 2 .2500 3 .2500 4 .2500 5 .2500
3 1 5 .2500 6 .2500 7 .2500 8 .2500
4 1 4 .2500 5 .2500 8 .2500 9 .2500
000
$ card 10
1 1.0 5.7908E-05 0.01288 1.2880E-02
1 1.0 8.8385E-05 0.02576 2.5761E-02
2 4 6 8
1 1.0 1.3003E-04 0.05152 5.1522E-02
5
$ card 12
0.01165 7.00E-04 10550 6550 0.01330
-6 -7 -8 -3 4850. 0
$ card 14
0 0 0 0 0 0 1 0 2 1
$ card 22 Heat transfer model
0 0 0 0 0 0
$ Card 27. Convergence Parameters
50 100 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0
$ card 29
1564.553060. 15.7 0.0 0 0.0 0.0 0 0. 0 0.
$ card 30
0
$ card 32
0
$ card 36
0 0 3 0 0 0 0

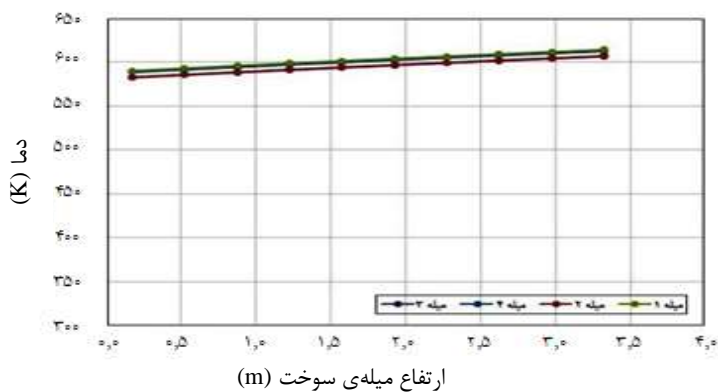
```

خروجی برنامه:

شکل‌های ۴-۷ و ۴-۸ به ترتیب تغییرات چگالی خنک‌کننده و تغییرات دمای سطح خارجی غلاف را بر حسب ارتفاع میله‌ی سوخت نشان می‌دهند.



شکل ۴-۷. تغییرات چگالی خنک کننده در کانال شماره ۵.

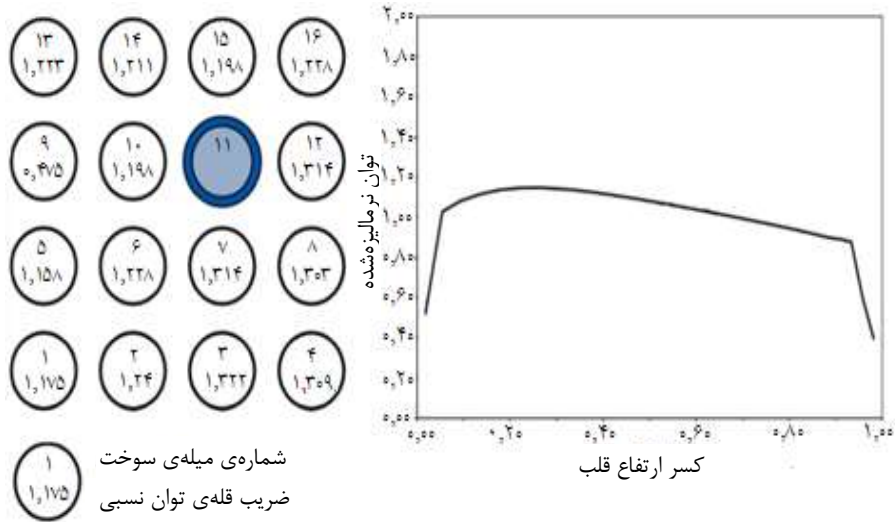


شکل ۴-۸. تغییرات دمای سطح خارجی غلاف بر حسب ارتفاع از پایین میله‌ی سوخت.

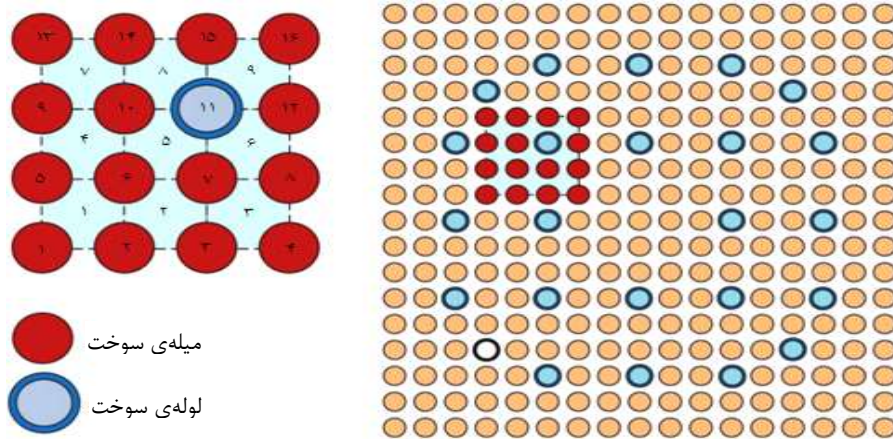
مثال ۴-۳. پارامترهای ترموهیدرولیکی رآکتور EPR با مشخصات موجود در جدول ۴-۳، شکل‌های ۴-۹ و ۴-۱۰ را به روش تحلیل زیر کانال بررسی کنید.

جدول ۴-۳. مشخصات رآکتور EPR.

پارامتر	مقدار
ضخامت شکاف	۰.۸۴ mm
ارتفاع فعال سوخت	۴.۲ m
قطر قرص سوخت	۸.۲ mm
ضخامت غلاف	۰.۷۵۱ mm
فشار سیستم	۱۵.۵۱ MPa
توان قلب رآکتور	۴۵۹۰ MW
شار گرمی سیال	۴۵۵۸ W/m²K
درجه حرارت سیال ورودی	۱۹۶.۲۵ °C



شکل ۴-۹. توزیع نسبی توان محوری قلب رآکتور EPR.



شکل ۴-۱۰. چیدمان میله‌های سوخت رآکتور EPR.

شکل ۴-۹ توزیع نسبی توان محوری قلب رآکتور را نشان می‌دهد. اعداد نوشته‌شده در داخل میله‌ها توزیع نسبی توان در داخل میله‌های سوخت انتخابی را مشخص می‌کند.
ورودی برنامه:

جدول ۴-۴. پارامترهای محاسبه‌شده‌ی مثال ۴-۳.

شماره‌ی کانال	محیط ترشده (m)	محیط گرم‌شده (m)	سطح مقطع عبور سیال (m ²)
۱،۳،۴،۷	۰،۲۹۸۴۵۰	۰،۲۹۸۴۵۰	۰،۰۰۰۰۸۷۸۴۳۵
۵،۶،۸،۹	۰،۳۲۰۰۴۰	۰،۲۲۳۸۳۰	۰،۰۰۰۰۷۶۰۹۷۸

Subchannel Analysis of the 4*4 FUEL RODS

```

1 2 2 1
1 9 16 20 2 0 0 5 0 0 0 1
-0.21
20
0.10500E+00
0.12834E+05 0.13544E+05 0.14440E+05 0.14298E+05 0.12648E+05
0.13413E+05
0.14352E+05 0.14232E+05 0.51882E+04 0.13085E+05 0.00000E+00
0.14352E+05
0.13358E+05 0.13227E+05 0.13085E+05 0.13413E+05
0.31500E+00
0.21316E+05 0.22495E+05 0.23983E+05 0.23747E+05 0.21007E+05
0.22277E+05
0.23837E+05 0.23638E+05 0.86170E+04 0.21733E+05 0.00000E+00
0.23837E+05
0.22187E+05 0.21969E+05 0.21733E+05 0.22277E+05
0.52500E+00
0.22368E+05 0.23606E+05 0.25167E+05 0.24919E+05 0.22045E+05
0.23377E+05
0.25014E+05 0.24805E+05 0.90425E+04 0.22806E+05 0.00000E+00
0.25014E+05
0.23282E+05 0.23054E+05 0.22806E+05 0.23377E+05
0.73500E+00
0.22922E+05 0.24190E+05 0.25789E+05 0.25536E+05 0.22590E+05
0.23956E+05
0.25633E+05 0.25419E+05 0.92662E+04 0.23370E+05 0.00000E+00
0.25633E+05
0.23858E+05 0.23624E+05 0.23370E+05 0.23956E+05
0.94500E+00

```

0.23020E+05 0.24294E+05 0.25900E+05 0.25646E+05 0.22687E+05
0.24059E+05
0.25744E+05 0.25528E+05 0.93061E+04 0.23471E+05 0.00000E+00
0.25744E+05
0.23961E+05 0.23726E+05 0.23471E+05 0.24059E+05
0.11550E+01
0.23121E+05 0.24400E+05 0.26013E+05 0.25758E+05 0.22786E+05
0.24164E+05
0.25856E+05 0.25640E+05 0.93467E+04 0.23573E+05 0.00000E+00
0.25856E+05
0.24065E+05 0.23829E+05 0.23573E+05 0.24164E+05
0.13650E+01
0.22970E+05 0.24241E+05 0.25844E+05 0.25590E+05 0.22638E+05
0.24006E+05
0.25687E+05 0.25472E+05 0.92857E+04 0.23420E+05 0.00000E+00
0.25687E+05
0.23908E+05 0.23674E+05 0.23420E+05 0.24006E+05
0.15750E+01
0.22720E+05 0.23977E+05 0.25563E+05 0.25312E+05 0.22392E+05
0.23745E+05
0.25408E+05 0.25196E+05 0.91849E+04 0.23165E+05 0.00000E+00
0.25408E+05
0.23649E+05 0.23417E+05 0.23165E+05 0.23745E+05
0.17850E+01
0.22318E+05 0.23553E+05 0.25110E+05 0.24863E+05 0.21995E+05
0.23325E+05
0.24958E+05 0.24749E+05 0.90222E+04 0.22755E+05 0.00000E+00
0.24958E+05
0.23230E+05 0.23002E+05 0.22755E+05 0.23325E+05
0.19950E+01
0.21968E+05 0.23183E+05 0.24716E+05 0.24473E+05 0.21650E+05
0.22959E+05
0.24567E+05 0.24361E+05 0.88806E+04 0.22398E+05 0.00000E+00
0.24567E+05
0.22865E+05 0.22641E+05 0.22398E+05 0.22959E+05
0.22050E+01
0.21616E+05 0.22811E+05 0.24320E+05 0.24081E+05 0.21303E+05
0.22591E+05
0.24173E+05 0.23970E+05 0.87383E+04 0.22039E+05 0.00000E+00
0.24173E+05
0.22499E+05 0.22278E+05 0.22039E+05 0.22591E+05

0.24150E+01
0.21165E+05 0.22336E+05 0.23813E+05 0.23579E+05 0.20859E+05
0.22120E+05
0.23669E+05 0.23471E+05 0.85560E+04 0.21579E+05 0.00000E+00
0.23669E+05
0.22030E+05 0.21813E+05 0.21579E+05 0.22120E+05
0.26250E+01
0.20762E+05 0.21911E+05 0.23360E+05 0.23130E+05 0.20462E+05
0.21699E+05
0.23219E+05 0.23024E+05 0.83933E+04 0.21169E+05 0.00000E+00
0.23219E+05
0.21611E+05 0.21399E+05 0.21169E+05 0.21699E+05
0.28350E+01
0.20261E+05 0.21382E+05 0.22796E+05 0.22572E+05 0.19968E+05
0.21175E+05
0.22658E+05 0.22469E+05 0.81908E+04 0.20658E+05 0.00000E+00
0.22658E+05
0.21089E+05 0.20882E+05 0.20658E+05 0.21175E+05
0.30450E+01
0.19758E+05 0.20851E+05 0.22230E+05 0.22012E+05 0.19472E+05
0.20650E+05
0.22096E+05 0.21911E+05 0.79874E+04 0.20145E+05 0.00000E+00
0.22096E+05
0.20565E+05 0.20364E+05 0.20145E+05 0.20650E+05
0.32550E+01
0.19358E+05 0.20429E+05 0.21780E+05 0.21565E+05 0.19078E+05
0.20231E+05
0.21648E+05 0.21467E+05 0.78255E+04 0.19737E+05 0.00000E+00
0.21648E+05
0.20149E+05 0.19951E+05 0.19737E+05 0.20231E+05
0.34650E+01
0.18806E+05 0.19847E+05 0.21159E+05 0.20951E+05 0.18534E+05
0.19655E+05
0.21031E+05 0.20855E+05 0.76026E+04 0.19175E+05 0.00000E+00
0.21031E+05
0.19575E+05 0.19383E+05 0.19175E+05 0.19655E+05
0.36750E+01
0.18203E+05 0.19210E+05 0.20480E+05 0.20279E+05 0.17939E+05
0.19024E+05
0.20356E+05 0.20186E+05 0.73586E+04 0.18559E+05 0.00000E+00
0.20356E+05

0.18946E+05 0.18761E+05 0.18559E+05 0.19024E+05
 0.38850E+01
 0.17853E+05 0.18840E+05 0.20086E+05 0.19889E+05 0.17594E+05
 0.18658E+05
 0.19965E+05 0.19797E+05 0.72170E+04 0.18202E+05 0.00000E+00
 0.19965E+05
 0.18582E+05 0.18400E+05 0.18202E+05 0.18658E+05
 0.40950E+01
 0.91213E+04 0.96259E+04 0.10262E+05 0.10161E+05 0.89893E+04
 0.95327E+04
 0.10200E+05 0.10115E+05 0.36873E+04 0.92998E+04 0.00000E+00
 0.10200E+05
 0.94939E+04 0.94007E+04 0.92998E+04 0.95327E+04

\$ card 7

1 20.00310.0126 40.00310.0126
 2 30.00310.0126 50.00310.0126 0.0017236
 3 60.00310.0126
 4 50.00310.0126 70.00310.0126
 5 6.001720.0126 8.001720.0126
 6 9.001720.0126
 7 80.00310.0126
 8 9.001720.0126
 9
 0 0

\$ card 8

1 1 1 0.25
 2 1 1 0.25 2 0.25
 3 1 2 0.25 3 0.25
 4 1 3 0.25
 5 1 1 0.25 4 0.25
 6 1 1 0.25 2 0.25 4 0.25 5 0.25
 7 1 2 0.25 3 0.25 5 0.25 6 0.25
 8 1 3 0.25 6 0.25
 9 1 4 0.25 7 0.25
 10 1 4 0.25 5 0.25 7 0.25 8 0.25
 11 1 5 0.25 6 0.25 8 0.25 9 0.25
 12 1 6 0.25 9 0.25
 13 1 7 0.25
 14 1 7 0.25 8 0.25
 15 1 8 0.25 9 0.25
 16 1 9 0.25

```

000
$ card 10
  1 1.0 8.78435E-05 2.98450E-02 2.98450E-02
  1 1.0 7.60978E-05 3.20040E-02 2.23830E-02
  5 6 8 9 0
0.00795 6.25E-04 10550 6550 0.0095
  -6 -2 -4 -5 5300.0 0
$ card 14
$ 18 20 23flow 26 27 28 22 28:properties of water
  0 0 1 1 0 1 1 0 1 0
$ card 18 two phase friction model
  2
$ card 20 void model
  3 3
$ card 22 heat transfer model
  0 0 0 0 0 0
$ card 26a parameters cross flow resistance
  0.5 0.0 0.5 0.0
$ card 26b selection CHF
  3 0 0 0.0 0 0 0. 0. 0.
$ card 27 convergence
  50 100 0. 0. 0. 0. -.01 0. 0.0. 0. 2
$ card 29 ISCHEM
  1568.374558.7 15.5 0.0 0 0.0 0.0 0.0 00. 0.0 0.0
$ card 30
  .0
$ card 31
  0 0 0 0 0
$ card 36
  0 0 3 6 2 0 0
$ card 37
  1 2 3 5 6 7 9
$ card 38
  7 10

```

خروجی برنامه:

شکل‌های ۴-۱۱ تا ۴-۱۳ تقریباً کلیه اطلاعاتی را که می‌توان از خروجی کد استخراج کرد، نشان می‌دهند. شکل ۴-۱۱ پارامترهای ترموهیدرولیکی کانال، شکل ۴-۱۲ پارامترهای ترموهیدرولیکی میله‌ی سوخت و شکل ۴-۱۳ اطلاعات خروجی مربوط به جریان‌های عرضی را نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که در شکل ۴-۱۳، علامت منفی نشان‌دهنده‌ی جهت جریان است.

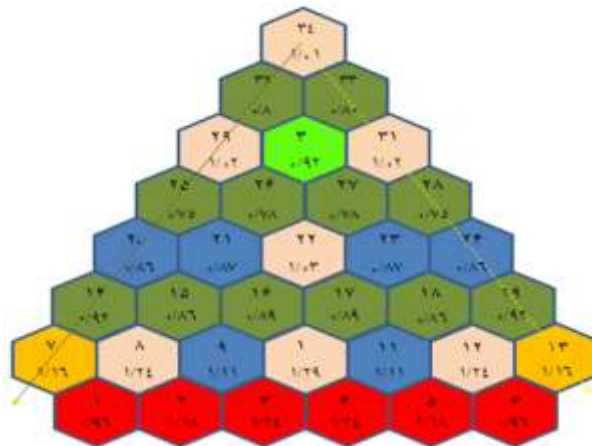
جریان عرضی از زیر کانال ۱ به ۲
فاصله‌ی محوری

TIME = 0.00000 SEC - DIVERSION CROSSFLOW BETWEEN ADJACENT CHANNELS (I,J), (KG/SEC/M)

X	(1, 2)	(1, 4)	(2, 3)	(2, 5)	(3, 6)	(4, 5)	(4, 7)	(5, 6)	(5, 8)	(6, 9)
0.1	-1.087E-02	-1.011E-02	-7.428E-03	-2.364E-02	-2.739E-02	-2.440E-02	-6.905E-03	-1.133E-02	-1.077E-02	-1.262E-02
0.3	-8.987E-03	7.919E-03	-6.153E-03	-1.866E-02	-2.159E-02	-1.973E-02	-5.371E-03	-9.282E-03	-8.451E-03	-9.887E-03
0.5	-7.234E-03	-6.366E-03	-4.957E-03	-1.462E-02	-1.724E-02	-1.579E-02	-4.258E-03	-7.456E-03	-6.739E-03	-7.880E-03
0.7	-5.797E-03	-5.099E-03	-3.988E-03	-1.194E-02	-1.379E-02	-1.263E-02	-3.376E-03	-5.987E-03	-5.378E-03	-6.297E-03
0.9	-4.628E-03	-4.078E-03	-3.206E-03	-9.557E-03	-1.106E-02	-1.010E-02	-2.688E-03	-4.799E-03	-4.299E-03	-5.049E-03
1.2	-3.687E-03	-3.244E-03	-2.590E-03	-7.639E-03	-8.867E-03	-8.070E-03	-2.137E-03	-3.845E-03	-3.431E-03	-4.048E-03
1.4	-2.929E-03	-2.580E-03	-2.076E-03	-6.112E-03	-7.125E-03	-6.443E-03	-1.705E-03	-3.075E-03	-2.742E-03	-3.257E-03
1.6	-2.321E-03	-2.049E-03	-1.671E-03	-4.890E-03	-5.733E-03	-5.141E-03	-1.365E-03	-2.456E-03	-2.192E-03	-2.624E-03
1.8	-1.835E-03	-1.630E-03	-1.345E-03	-3.919E-03	-4.628E-03	-4.098E-03	-1.099E-03	-1.956E-03	-1.757E-03	-2.123E-03
2.0	-1.448E-03	-1.290E-03	-1.086E-03	-3.135E-03	-3.735E-03	-3.263E-03	-8.849E-04	-1.555E-03	-1.404E-03	-1.716E-03
2.2	-1.140E-03	-1.018E-03	-8.777E-04	-2.504E-03	-3.017E-03	-2.594E-03	-7.147E-04	-1.231E-03	-1.120E-03	-1.388E-03
2.4	-8.953E-04	-8.072E-04	-7.101E-04	-2.006E-03	-2.449E-03	-2.059E-03	-5.826E-04	-9.708E-04	-8.963E-04	-1.128E-03
2.6	-7.017E-04	-6.365E-04	-5.766E-04	-1.602E-03	-1.989E-03	-1.630E-03	-4.764E-04	-7.617E-04	-7.140E-04	-9.163E-04
2.8	-5.475E-04	-5.077E-04	-4.684E-04	-1.287E-03	-1.629E-03	-1.288E-03	-3.954E-04	-5.924E-04	-5.725E-04	-7.511E-04
3.0	-4.256E-04	-4.062E-04	-3.814E-04	-1.036E-03	-1.342E-03	-1.015E-03	-3.316E-04	-4.564E-04	-4.595E-04	-6.185E-04
3.2	-3.309E-04	-3.188E-04	-3.137E-04	-8.254E-04	-1.101E-03	-7.959E-04	-2.765E-04	-3.486E-04	-3.630E-04	-5.056E-04
3.4	-2.545E-04	-2.618E-04	-2.566E-04	-6.726E-04	-9.247E-04	-6.223E-04	-2.398E-04	-2.601E-04	-2.951E-04	-4.246E-04
3.6	-1.937E-04	-2.218E-04	-2.099E-04	-5.575E-04	-7.907E-04	-4.852E-04	-2.136E-04	-1.885E-04	-2.446E-04	-3.836E-04
3.8	-1.498E-04	-1.732E-04	-1.709E-04	-4.423E-04	-6.588E-04	-3.747E-04	-1.831E-04	-1.347E-04	-1.910E-04	-3.002E-04

شکل ۴-۱۳. اطلاعات خروجی کد برای جریان‌های عرضی بین مجتمع‌های سوخت.

مثال ۴-۴. مطلوب است به دست آوردن دمای متوسط قلب و نسبت انحراف از جوشش هسته‌ای^۱ در طول کانال شماره‌ی ۱۰ برای رآکتور VVER به صورت تحلیل قلب با تقارن یک ششم مطابق شکل ۴-۱۴. در این شکل مقادیر فاکتور قلّه‌ی شعاعی توان بر روی هر مجتمع معلوم است.



شکل ۴-۱۴. نمایی از تقارن یک ششم قلب رآکتور بوشهر.

1. DNBR

ورودی برنامه:

VVER 1000 CORE -one sixth- BURNUP OF 0 MWD/T -34 FUEL
ASSEMBLIES OR CHANNELS
\$
\$ card 2
0 2 2 0
\$ card 3
1 34 0 20 3 0 0 40 0 0 0 1
\$ card 4
-0.17750
\$ card 5
20
8.8700E-02
2.2307E+06 2.7419E+06 2.8814E+06 2.8814E+06 2.7419E+06
2.2307E+06
1.3477E+06 2.8814E+06 2.5793E+06 2.9976E+06 2.5793E+06
2.8814E+06
1.3477E+06 1.0689E+06 1.9984E+06 2.0681E+06 2.0681E+06
1.9984E+06
1.0689E+06 0.9992E+06 2.0216E+06 2.3934E+06 2.0216E+06
0.9992E+06
0.8714E+06 1.8125E+06 1.8125E+06 0.8714E+06 1.1851E+06
2.1378E+06
1.1851E+06 0.9294E+06 0.9294E+06 0.3911E+06
2.6620E-01
3.5432E+06 4.3552E+06 4.5766E+06 4.5766E+06 4.3552E+06
3.5432E+06
2.1407E+06 4.5766E+06 4.0968E+06 4.7612E+06 4.0968E+06
4.5766E+06
2.1407E+06 1.6978E+06 3.1741E+06 3.2848E+06 3.2848E+06
3.1741E+06
1.6978E+06 1.5870E+06 3.2110E+06 3.8016E+06 3.2110E+06
1.5870E+06
1.3840E+06 2.8788E+06 2.8788E+06 1.3840E+06 1.8823E+06
3.3956E+06
1.8823E+06 1.4763E+06 1.4763E+06 0.6212E+06
4.4370E-01
4.8099E+06 5.9121E+06 6.2128E+06 6.2128E+06 5.9121E+06
4.8099E+06
2.9059E+06 6.2128E+06 5.5614E+06 6.4633E+06 5.5614E+06
6.2128E+06

2.9059E+06 2.3047E+06 4.3088E+06 4.4592E+06 4.4592E+06
4.3088E+06
2.3047E+06 2.1544E+06 4.3589E+06 5.1606E+06 4.3589E+06
2.1544E+06
1.8788E+06 3.9080E+06 3.9080E+06 1.8788E+06 2.5552E+06
4.6095E+06
2.5552E+06 2.0041E+06 2.0041E+06 0.8434E+06
6.2120E-01
5.8342E+06 7.1712E+06 7.5358E+06 7.5358E+06 7.1712E+06
5.8342E+06
3.5248E+06 7.5358E+06 6.7457E+06 7.8397E+06 6.7457E+06
7.5358E+06
3.5248E+06 2.7955E+06 5.2264E+06 5.4088E+06 5.4088E+06
5.2264E+06
2.7955E+06 2.6132E+06 5.2872E+06 6.2596E+06 5.2872E+06
2.6132E+06
2.2789E+06 4.7403E+06 4.7403E+06 2.2789E+06 3.0994E+06
5.5911E+06
3.0994E+06 2.4309E+06 2.4309E+06 1.0230E+06
7.9870E-01
6.5066E+06 7.9977E+06 8.4043E+06 8.4043E+06 7.9977E+06
6.5066E+06
3.9310E+06 8.4043E+06 7.5232E+06 8.7432E+06 7.5232E+06
8.4043E+06
3.9310E+06 3.1177E+06 5.8288E+06 6.0321E+06 6.0321E+06
5.8288E+06
3.1177E+06 2.9144E+06 5.8966E+06 6.9810E+06 5.8966E+06
2.9144E+06
2.5416E+06 5.2866E+06 5.2866E+06 2.5416E+06 3.4566E+06
6.2355E+06
3.4566E+06 2.7110E+06 2.7110E+06 1.1409E+06
9.7620E-01
6.9565E+06 8.5507E+06 8.9855E+06 8.9855E+06 8.5507E+06
6.9565E+06
4.2029E+06 8.9855E+06 8.0434E+06 9.3478E+06 8.0434E+06
8.9855E+06
4.2029E+06 3.3333E+06 6.2319E+06 6.4493E+06 6.4493E+06
6.2319E+06
3.3333E+06 3.1159E+06 6.3043E+06 7.4637E+06 6.3043E+06
3.1159E+06

2.7174E+06 5.6522E+06 5.6522E+06 2.7174E+06 3.6956E+06
6.6666E+06
3.6956E+06 2.8985E+06 2.8985E+06 1.2198E+06
1.1537E+00
7.1506E+06 8.7893E+06 9.2362E+06 9.2362E+06 8.7893E+06
7.1506E+06
4.3201E+06 9.2362E+06 8.2679E+06 9.6086E+06 8.2679E+06
9.2362E+06
4.3201E+06 3.4263E+06 6.4057E+06 6.6292E+06 6.6292E+06
6.4057E+06
3.4263E+06 3.2028E+06 6.4802E+06 7.6720E+06 6.4802E+06
3.2028E+06
2.7932E+06 5.8099E+06 5.8099E+06 2.7932E+06 3.7987E+06
6.8527E+06
3.7987E+06 2.9794E+06 2.9794E+06 1.2538E+06
1.3312E+00
7.2044E+06 8.8554E+06 9.3056E+06 9.3056E+06 8.8554E+06
7.2044E+06
4.3526E+06 9.3056E+06 8.3300E+06 9.6809E+06 8.3300E+06
9.3056E+06
4.3526E+06 3.4521E+06 6.4539E+06 6.6790E+06 6.6790E+06
6.4539E+06
3.4521E+06 3.2269E+06 6.5289E+06 7.7297E+06 6.5289E+06
3.2269E+06
2.8142E+06 5.8535E+06 5.8535E+06 2.8142E+06 3.8273E+06
6.9042E+06
3.8273E+06 3.0018E+06 3.0018E+06 1.2632E+06
1.5087E+00
7.0789E+06 8.7012E+06 9.1436E+06 9.1436E+06 8.7012E+06
7.0789E+06
4.2768E+06 9.1436E+06 8.1850E+06 9.5123E+06 8.1850E+06
9.1436E+06
4.2768E+06 3.3920E+06 6.3415E+06 6.5628E+06 6.5628E+06
6.3415E+06
3.3920E+06 3.1707E+06 6.4153E+06 7.5951E+06 6.4153E+06
3.1707E+06
2.7652E+06 5.7516E+06 5.7516E+06 2.7652E+06 3.7607E+06
6.7840E+06
3.7607E+06 2.9495E+06 2.9495E+06 1.2412E+06
1.6862E+00

6.9027E+06 8.4846E+06 8.9160E+06 8.9160E+06 8.4846E+06
6.9027E+06
4.1704E+06 8.9160E+06 7.9813E+06 9.2756E+06 7.9813E+06
8.9160E+06
4.1704E+06 3.3075E+06 6.1837E+06 6.3994E+06 6.3994E+06
6.1837E+06
3.3075E+06 3.0918E+06 6.2556E+06 7.4061E+06 6.2556E+06
3.0918E+06
2.6964E+06 5.6085E+06 5.6085E+06 2.6964E+06 3.6671E+06
6.6151E+06
3.6671E+06 2.8761E+06 2.8761E+06 1.2103E+06
1.8637E+00
6.5842E+06 8.0931E+06 8.5046E+06 8.5046E+06 8.0931E+06
6.5842E+06
3.9779E+06 8.5046E+06 7.6130E+06 8.8475E+06 7.6130E+06
8.5046E+06
3.9779E+06 3.9779E+06 6.3099E+06 5.8984E+06 6.1041E+06
5.8984E+06
3.9779E+06 2.9492E+06 5.9669E+06 7.0643E+06 5.9669E+06
2.9492E+06
2.5719E+06 5.3497E+06 5.3497E+06 2.5719E+06 3.4978E+06
6.3099E+06
3.4978E+06 2.7434E+06 2.7434E+06 1.1545E+06
2.0412E+00
6.2045E+06 7.6263E+06 8.0141E+06 8.0141E+06 7.6263E+06
6.2045E+06
3.7485E+06 8.0141E+06 7.1739E+06 8.3372E+06 7.1739E+06
8.0141E+06
3.7485E+06 2.9729E+06 5.5582E+06 5.7520E+06 5.7520E+06
5.5582E+06
2.9729E+06 2.7791E+06 5.6228E+06 6.6569E+06 5.6228E+06
2.7791E+06
2.4236E+06 5.0411E+06 5.0411E+06 2.4236E+06 3.2961E+06
5.9459E+06
3.2961E+06 2.5852E+06 2.5852E+06 1.0879E+06
2.2187E+00
5.7724E+06 7.0953E+06 7.4561E+06 7.4561E+06 7.0953E+06
5.7724E+06
3.4875E+06 7.4561E+06 6.6744E+06 7.7567E+06 6.6744E+06
7.4561E+06

3.4875E+06 2.7659E+06 5.1711E+06 5.3515E+06 5.3515E+06
5.1711E+06
2.7659E+06 2.5855E+06 5.2313E+06 6.1933E+06 5.2313E+06
2.5855E+06
2.2548E+06 4.6901E+06 4.6901E+06 2.2548E+06 3.0666E+06
5.5319E+06
3.0666E+06 2.4052E+06 2.4052E+06 1.0121E+06
2.3962E+00
5.2513E+06 6.4548E+06 6.7830E+06 6.7830E+06 6.4548E+06
5.2513E+06
3.1727E+06 6.7830E+06 6.0719E+06 7.0565E+06 6.0719E+06
6.7830E+06
3.1727E+06 2.5162E+06 4.7043E+06 4.8684E+06 4.8684E+06
4.7043E+06
2.5162E+06 2.3521E+06 4.7590E+06 5.6343E+06 4.7590E+06
2.3521E+06
2.0513E+06 4.2667E+06 4.2667E+06 2.0513E+06 2.5162E+06
5.5795E+06
2.5162E+06 2.1880E+06 2.1880E+06 0.9208E+06
2.5737E+00
4.6655E+06 5.7347E+06 6.0263E+06 6.0263E+06 5.7347E+06
4.6655E+06
2.8187E+06 6.0263E+06 5.3945E+06 6.2693E+06 5.3945E+06
6.0263E+06
2.8187E+06 2.2355E+06 4.1795E+06 4.3253E+06 4.3253E+06
4.1795E+06
2.2355E+06 2.0897E+06 4.2281E+06 5.0057E+06 4.2281E+06
2.0897E+06
1.8224E+06 3.7907E+06 3.7907E+06 1.8224E+06 2.4785E+06
4.4711E+06
2.4785E+06 1.9439E+06 1.9439E+06 0.8180E+06
2.7512E+00
4.0673E+06 4.9994E+06 5.2536E+06 5.2536E+06 4.9994E+06
4.0673E+06
2.4573E+06 5.2536E+06 4.7028E+06 5.4654E+06 4.7028E+06
5.2536E+06
2.4573E+06 1.9489E+06 3.6436E+06 3.7707E+06 3.7707E+06
3.6436E+06
1.9489E+06 1.8218E+06 3.6860E+06 4.3639E+06 3.6860E+06
1.8218E+06

1.5888E+06 3.3047E+06 3.3047E+06 1.5888E+06 2.1607E+06
3.8978E+06
2.1607E+06 1.6947E+06 1.6947E+06 0.7131E+06
2.9287E+00
3.4183E+06 4.2016E+06 4.4153E+06 4.4153E+06 4.2016E+06
3.4183E+06
2.0652E+06 4.4153E+06 3.9524E+06 4.5933E+06 3.9524E+06
4.4153E+06
2.0652E+06 1.6379E+06 3.0622E+06 3.1690E+06 3.1690E+06
3.0622E+06
1.6379E+06 1.5311E+06 3.0978E+06 3.6675E+06 3.0978E+06
1.5311E+06
1.3352E+06 2.7773E+06 2.7773E+06 1.3352E+06 1.6379E+06
3.6319E+06
1.6379E+06 1.4243E+06 1.4243E+06 0.5993E+06
3.1062E+00
2.6538E+06 3.2620E+06 3.4278E+06 3.4278E+06 3.2620E+06
2.6538E+06
1.6033E+06 3.4278E+06 3.0684E+06 3.5660E+06 3.0684E+06
3.4278E+06
1.6033E+06 1.2716E+06 2.3774E+06 2.4603E+06 2.4603E+06
2.3774E+06
1.2716E+06 1.1887E+06 2.4050E+06 2.8473E+06 2.4050E+06
1.1887E+06
1.0366E+06 2.1562E+06 2.1562E+06 1.0366E+06 1.4098E+06
2.5432E+06
1.4098E+06 1.1057E+06 1.1057E+06 0.4653E+06
3.2837E+00
1.8256E+06 2.2440E+06 2.3581E+06 2.3581E+06 2.2440E+06
1.8256E+06
1.1029E+06 2.3581E+06 2.1109E+06 2.4532E+06 2.1109E+06
2.3581E+06
1.1029E+06 0.8747E+06 1.6354E+06 1.6925E+06 1.6925E+06
1.6354E+06
0.8747E+06 0.8177E+06 1.6545E+06 1.9587E+06 1.6545E+06
0.8177E+06
0.7131E+06 1.4833E+06 1.4833E+06 0.7131E+06 0.9698E+06
1.7495E+06
0.9698E+06 0.7606E+06 0.7606E+06 0.3201E+06
3.4612E+00

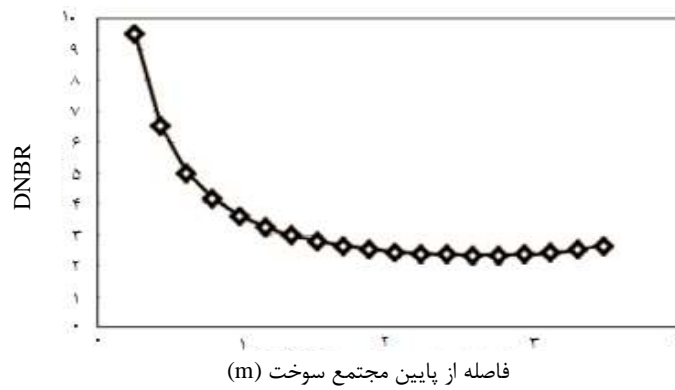
8.4360E+05 1.0369E+06 1.0897E+06 1.0897E+06 1.0369E+06
 8.4360E+05
 0.5097E+06 1.0897E+06 9.7540E+05 1.1336E+06 9.7540E+05
 1.0897E+06
 0.5097E+06 4.0425E+05 7.5570E+05 7.8210E+05 7.8210E+05
 7.5570E+05
 4.0425E+05 3.7785E+05 7.6450E+05 9.0510E+05 7.6450E+05
 3.7785E+05
 3.2955E+05 6.8540E+05 6.8540E+05 3.2955E+05 4.4815E+05
 8.0850E+05
 4.4815E+05 3.5150E+05 3.5150E+05 1.4793E+05
 1 8.0361 0.236 -7.0361 0.236 2.0361 0.236
 2 9.0361 0.236 8.0361 0.236 3.0361 0.236
 3 10.0361 0.236 9.0361 0.236 4.0361 0.236
 4 11.0361 0.236 10.0361 0.236 5.0361 0.236
 5 12.0361 0.236 11.0361 0.236 6.0361 0.236
 6 -13.0361 0.236 12.0361 0.236
 7 -14.0361 0.236 8.0361 0.236
 8 -14.0361 0.236 15.0361 0.236 9.0361 0.236
 9 16.0361 0.236 15.0361 0.236 10.0361 0.236
 10 17.0361 0.236 16.0361 0.236 11.0361 0.236
 11 17.0361 0.236 18.0361 0.236 12.0361 0.236
 12 18.0361 0.236 -19.0361 0.236 -13.0361 0.236
 13 -19.0361 0.236
 14 15.0361 0.236 -20.0361 0.236
 15 16.0361 0.236 -20.0361 0.236 21.0361 0.236
 16 22.0361 0.236 21.0361 0.236 17.0361 0.236
 17 22.0361 0.236 23.0361 0.236 18.0361 0.236
 18 23.0361 0.236 -19.0361 0.236 -24.0361 0.236
 19 -24.0361 0.236
 20 -25.0361 0.236 21.0361 0.236
 21 -25.0361 0.236 26.0361 0.236 22.0361 0.236
 22 23.0361 0.236 27.0361 0.236 26.0361 0.236
 23 -28.0361 0.236 27.0361 0.236 -24.0361 0.236
 24 -28.0361 0.236
 25 26.0361 0.236 -29.0361 0.236
 26 -31.0361 0.236 30.0361 0.236 -28.0361 0.236
 28 -31.0361 0.236
 27 -28.0361 0.236 30.0361 0.236 -31.0361 0.236
 29 -32.0361 0.236 30.0361 0.236
 30 -32.0361 0.236 -33.0361 0.236 -31.0361 0.236

31 -33.0361 0.236
 32 -34.0361 0.236 -33.0361 0.236
 33 -34.0361 0.236
 34
 00 00
 \$ card 10
 1 1.0 0.02535 9.7078 8.8910 311. 1
 1 0.5 0.02535 9.7078 8.8910 311. 1
 7 14 20 25 29 32 34 33 31 28 24 19
 13 0
 1 0.167 0.02535 9.7078 8.8910 311. 1
 34
 \$ card 12
 0.00757 6.85E-04 10550 6550 0.0091
 -6 -7 -8 -3 5300.0
 \$ card 14
 0 0 1 1 0 1 0 0 1 0
 \$ card 18
 2
 \$ card 20
 3 3 0
 \$ card 22
 0 0 0 0 0 0
 \$ card 26a
 0.5 0.0 0.5 0.0
 \$ card 26b
 3 0 0 0.0 0 0 0. 0. 0.
 \$ card 27
 \$ 50 100 0.01 0.05 0.8 0.8 -1 +4 30 0.01 0.001 2
 \$ card 29
 1564.154058 15.7 0.0 0 0.0 0.05 0. 0. 0 0.0
 0. 0 0
 0 0 0 0 0
 \$ card 36
 0 0 3 0 0 4 0
 1 40 41 42

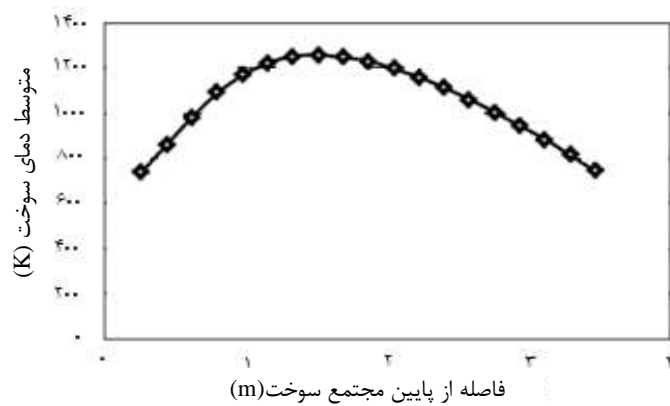
در کارت شماره‌ی ۱۰ این مسئله، اعداد دوم ضریبی است که به اعداد بعدی از جمله سطح مقطع عبور جریان ضرب می‌شود تا سطح مقطع عبوری برای شماره‌ی کانال‌هایی که در زیر آن خط نوشته شده است حساب شود.

خروجی برنامه:

شکل‌های ۱۵-۴ و ۱۶-۴ تغییرات نسبت انحراف از جوشش هسته‌ای و متوسط دمای سوخت را بر حسب ارتفاع از پایین مجتمع سوخت نشان می‌دهند.

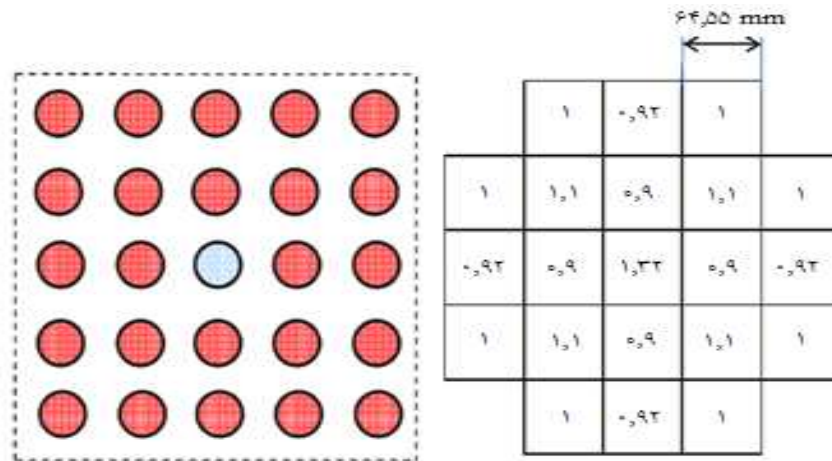


شکل ۱۵-۴. تغییرات DNBR بر حسب ارتفاع مجتمع سوخت.



شکل ۱۶-۴. تغییرات متوسط دمای سوخت در طول مجتمع سوخت.

مثال ۵-۴. قلب یک رآکتور آب تحت فشار با سوخت اورانیوم اکسید با شرایط هندسی نشان داده شده در شکل ۱۷-۴ و جدول ۵-۴، مفروض است. مطلوب است رسم تغییرات DNBR بر حسب ارتفاع مجتمع سوخت گرم.



شکل ۴-۱۷. مقدار فاکتور قله‌ی شعاعی توان در مجتمع‌های سوخت مختلف.
جدول ۴-۵. مشخصات قلب رآکتور آب تحت فشار.

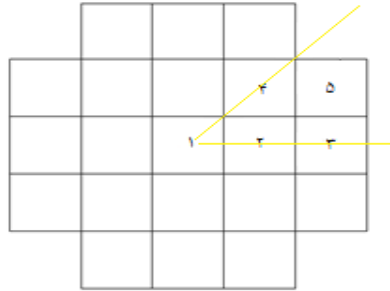
پارامتر	مقدار
قطر میله‌ی سوخت	۹,۱ mm
گام میله	۱۲,۷۵ mm
ارتفاع فعال میله‌ی سوخت	۳,۵۵ m
قطر قرص سوخت	۷,۵۷ mm
ضخامت غلاف	۰,۶۸۵ mm
فشار سیستم	۱۵,۴ MPa
توان متوسط خطی میله سوخت	۱۷۳,۴ W/cm
دبی جرمی سیال	۳۸۵۰ kg/m ^۲ s
دمای سیال ورودی	۲۹۱,۹ °C
رسانندگی حرارتی شکاف	۵۳۰۰ W/m ^۲ K

جدول ۴-۶. توزیع توان محوری در قلب رآکتور.

مختصات از پایین قلب رآکتور (%)	۵	۱۵	۲۵	۳۵	۴۵	۵۵	۶۵	۷۵	۸۵	۹۵
ضریب قله‌ی توان	۰,۳۶	۰,۸۲	۱,۱۲	۱,۳۱	۱,۳۹	۱,۳۹	۱,۳۱	۱,۱۲	۰,۸۲	۰,۳۶

توزیع توان شعاعی برای هر مجتمع در شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است. نحوه‌ی شماره‌گذاری نیز در شکل ۴-۱۸ ارایه شده است. برای محاسبه‌ی توان در هر حجم کنترل:

توان در هر حجم کنترل = توان خطی میله‌ی سوخت × تعداد میله‌های سوخت در یک مجتمع سوخت × ضریب قله‌ی شعاعی × ضریب قله‌ی محوری



شکل ۴-۱۸. نحوه‌ی شماره‌گذاری مجتمع‌های سوخت در قلب رآکتور.

ورودی برنامه:

OCTANT OF PWR CORE - 5 FUEL ASSEMBLIES OR CHANNELS

\$ Three-equation model with homogeneous void model

```

0 2 2 0
1 5 0 10 3 0 0 40 0 0 0 1
-0.355
10
0.1775
2.4720E+04 6.7418E+04 6.8916E+04 8.2400E+04 1.4982E+05
0.5325
5.6306E+04 1.5356E+05 1.5698E+05 1.8769E+05 3.4125E+05
0.8875
7.6906E+04 2.0974E+05 2.1441E+05 2.5635E+05 4.6610E+05
1.2425
8.9953E+04 2.4533E+05 2.5078E+05 2.9984E+05 5.4517E+05
1.5975
9.5446E+04 2.6031E+05 2.6609E+05 3.1815E+05 5.7846E+05
1.9525
9.5446E+04 2.6031E+05 2.6609E+05 3.1815E+05 5.7846E+05
2.3075
8.9953E+04 2.4533E+05 2.5078E+05 2.9984E+05 5.4517E+05
2.6625
7.6906E+04 2.0974E+05 2.1441E+05 2.5635E+05 4.6610E+05
3.0175
5.6306E+04 1.5356E+05 1.5698E+05 1.8769E+05 3.4125E+05
3.3725
2.4720E+04 6.7418E+04 6.8916E+04 8.2400E+04 1.4982E+05

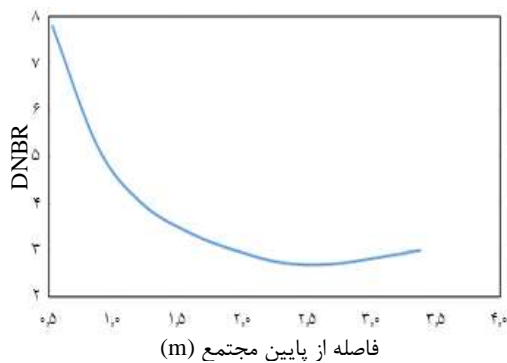
```

```

$00iiixxxiii-----=====iii-----=====
1 -2.01905.06455
2 4.01905.06455 -3.01905.06455
3 5.01905.06455
4 5.01905.06455
5
00 00
$iiiiieeeee-----2222222222-----44444444444iiiiii
1 1.0 0.00254073 0.71471233 0.686123836 24. 1
1 0.5 0.00254073 0.71471233 0.686123836 24. 1
2 3 4 0
1 0.125 0.00254073 0.71471233 0.686123836 24. 1
1 0
0.00757 6.85E-04 10550 6550 0.0091
-6 -7 -8 -3 5300.0 0
0 0 1 1 0 1 0 0 1 0
2
3 3 0
0 0 0 0 0 0
0.5 0.0 0.5 0.0
3 0 0 0.0 0 0 0. 0. 0.
1565.05 3850 15.4 0.0 0 0.0 0.00 0.0 00. 0.0 0.0
0. 0 0
0 0 0 0 0
0 0 3 2 4 5 0
1 5
1 3 4 5
1 38 39 40 42

```

خروجی برنامه:



شکل ۴-۱۹. تغییرات DNBR بر حسب ارتفاع از پایین مجتمع سوخت گرم.

شکل ۴-۱۹ تغییرات نسبت انحراف از جوشش هسته‌ای را برای مجتمع سوخت گرم نشان می‌دهد. این نسبت نشان‌دهنده‌ی شار حرارتی بحرانی به شار حرارت محلی است. هر اندازه این نسبت عدد بزرگ‌تری باشد، حاشیه‌ی ایمنی زیادتر خواهد بود.

مثال ۴-۶. برای مسئله‌ی قبل در صورتی که توزیع دبی ورودی مجتمع‌ها به صورت جدول ۴-۷ باشد. منحنی تغییرات توان رآکتور را ترسیم کنید. مدل‌سازی تا ۹ ثانیه مدنظر است (گذرا).

جدول ۴-۷. توزیع دبی ورودی مجتمع‌ها.

توزیع دبی ورودی مجتمع‌ها					
شماره‌ی مجتمع	۱	۲	۳	۴	۵
کسر دبی	۱/۰۸	۰/۹۸	۰/۹۷	۰/۹۳	۱/۰۵

ورودی برنامه:

OCTANT OF PWR CORE - 5 FUEL ASSEMBLIES OR CHANNELS

\$ Three-equation model with homogeneous void model

0 2 2 0

1 5 0 10 3 0 0 40 0 0 0 1

-0.355

10

0.1775

2.4720E+04 6.7418E+04 6.8916E+04 8.2400E+04 1.4982E+05

0.5325

5.6306E+04 1.5356E+05 1.5698E+05 1.8769E+05 3.4125E+05

0.8875

7.6906E+04 2.0974E+05 2.1441E+05 2.5635E+05 4.6610E+05

1.2425

8.9953E+04 2.4533E+05 2.5078E+05 2.9984E+05 5.4517E+05

1.5975

9.5446E+04 2.6031E+05 2.6609E+05 3.1815E+05 5.7846E+05

1.9525

9.5446E+04 2.6031E+05 2.6609E+05 3.1815E+05 5.7846E+05

2.3075

8.9953E+04 2.4533E+05 2.5078E+05 2.9984E+05 5.4517E+05

2.6625

7.6906E+04 2.0974E+05 2.1441E+05 2.5635E+05 4.6610E+05

3.0175

5.6306E+04 1.5356E+05 1.5698E+05 1.8769E+05 3.4125E+05

3.3725

2.4720E+04 6.7418E+04 6.8916E+04 8.2400E+04 1.4982E+05

\$00iiixxxiii-----=====iii-----=====

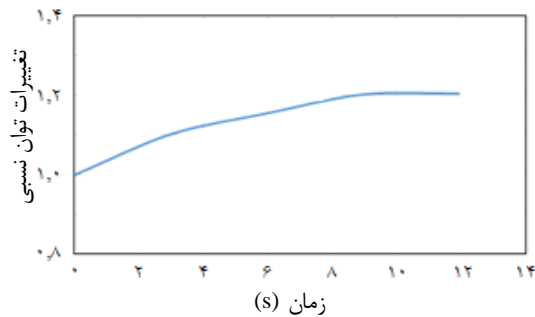
```

1 -2.01905.06455
2 4.01905.06455 -3.01905.06455
3 5.01905.06455
4 5.01905.06455
5
00 00
$iiiiieeeee-----+++++++-----+++++++iiiiii
1 1.0 0.00254073 0.71471233 0.686123836 24. 1
1 0.5 0.00254073 0.71471233 0.686123836 24. 1
2 3 4 0
1 0.125 0.00254073 0.71471233 0.686123836 24. 1
1 0
0.00757 6.85E-04 10550 6550 0.0091
-6 -7 -8 -3 5300.0 0
0 0 1 1 0 1 0 0 1 0
2
3 3 0
0 0 0 0 0 0
0.5 0.0 0.5 0.0
3 0 0 0.0 0 0 0. 0. 0.
1565.05 3850 15.4 0.0 0 0.0 0.00 0.0 00. 0.0 0.0
$ card 30a
$11111-----+++++++
9.0 3 0
$ card 30b
$----iiiiii-----+++++++iiiiii-----+++++++iiiiii-----
.01 100 3.0 .01 100 6.0 .01 100 9.0
$ card 32
0 0 0 5 0
$ card 34
$-----+++++++-----+++++++-----+++++++-----+++++++
0.0 1.0 3.0 1.1 6.0 1.15 9.0 1.2 10 1.2
$CARD 36
0 100 3 2 4 5 0
1 5
1 3 4 5
1 38 39 40 42
end

```

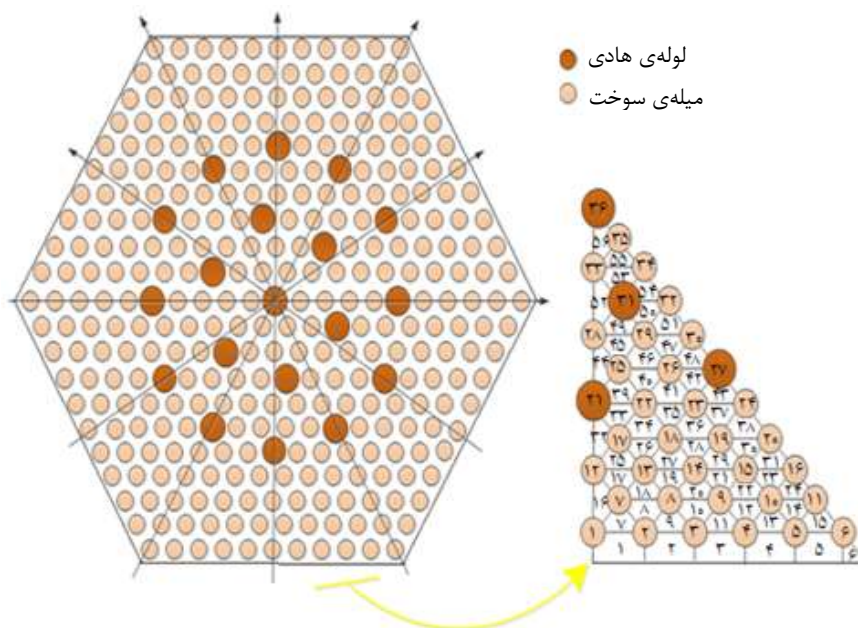
خروجی برنامه:

شکل ۴-۲ تغییرات نوان راکتور را بر حسب زمان تا ۹ ثانیه نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۰. تغییرات نسبی توان بر حسب زمان.

مثال ۴-۷. با توجه به شماره گذاری انجام شده در شکل ۴-۲۲ برای رآکتور آبی تحت فشار نیروگاه اتمی بوشهر و با توجه به مشخصات رآکتور در گزارش تحلیل ایمنی، نیمه‌ی بالایی قلب رآکتور را (از مرکز قلب به بالا) در حالت زیر کانال و با توجه به تقارن یک دوازدهم شکل ۴-۲۱ مدل کنید.



شکل ۴-۲۱. آرایش میله‌های سوخت در تقارن یک دوازدهم قلب رآکتور بوشهر و نحوه‌ی شماره گذاری. برای مدل سازی نیمه‌ی بالایی قلب رآکتور، ابتدا کل قلب رآکتور با توجه به تقارن و مطابق شکل ۴-۲۱ مدل می‌شود. سپس دمای هر کانال در مرکز از خروجی کد استخراج می‌شود. در وهله‌ی

بعدی برای مدل‌سازی نیمه‌ی بالایی در حالت زیر کانال، با فعال کردن کارت شماره‌ی ۳۱، دماهای استخراج‌شده از خروجی در ورودی فایل جدید برای هر ۵۶ کانال وارد می‌شود. از طرفی برای وارد کردن توان هر میله ، باید توان میله از از نیمه‌ی قلب به بالا وارد می‌شود و ارتفاع کل قلب نصف وارد شود.

ورودی برنامه:

VVER 1000 CORE - BURNUP OF 0 MWD/T -SUBCHANNEL 36 FUEL

RODS

\$

\$ 3000 MWth power from FSAR - RAHMAN GHARARI

\$

\$ card 2

1 2 2 1

\$ card 3

1 56 36 10 4 0 0 5 0 0 0 1

\$ card 4

-0.1775

\$ card 5

10

0.88750E-01

0.28448E+05 0.28448E+05 0.28448E+05 0.28448E+05 0.28448E+05

0.28448E+05

0.28448E+05 0.28448E+05 0.28448E+05 0.28448E+05 0.28448E+05

0.28448E+05

0.28448E+05 0.28448E+05 0.28448E+05 0.28448E+05 0.28448E+05

0.28448E+05

0.28448E+05 0.28448E+05 0.00000E+00 0.28448E+05 0.28448E+05

0.28448E+05

0.28448E+05 0.28448E+05 0.00000E+00 0.28448E+05 0.28448E+05

0.28448E+05

0.00000E+00 0.28448E+05 0.28448E+05 0.28448E+05 0.28448E+05

0.00000E+00

0.26625E+00

0.26807E+05 0.26807E+05 0.26807E+05 0.26807E+05 0.26807E+05

0.26807E+05

0.26807E+05 0.26807E+05 0.26807E+05 0.26807E+05 0.26807E+05

0.26807E+05

0.26807E+05 0.26807E+05 0.26807E+05 0.26807E+05 0.26807E+05

0.26807E+05

0.26807E+05 0.26807E+05 0.00000E+00 0.26807E+05 0.26807E+05
0.26807E+05
0.26807E+05 0.26807E+05 0.00000E+00 0.26807E+05 0.26807E+05
0.26807E+05
0.00000E+00 0.26807E+05 0.26807E+05 0.26807E+05 0.26807E+05
0.00000E+00
0.44375E+00
0.24941E+05 0.24941E+05 0.24941E+05 0.24941E+05 0.24941E+05
0.24941E+05
0.24941E+05 0.24941E+05 0.24941E+05 0.24941E+05 0.24941E+05
0.24941E+05
0.24941E+05 0.24941E+05 0.24941E+05 0.24941E+05 0.24941E+05
0.24941E+05
0.24941E+05 0.24941E+05 0.00000E+00 0.24941E+05 0.24941E+05
0.24941E+05
0.24941E+05 0.24941E+05 0.00000E+00 0.24941E+05 0.24941E+05
0.24941E+05
0.00000E+00 0.24941E+05 0.24941E+05 0.24941E+05 0.24941E+05
0.00000E+00
0.62125E+00
0.22689E+05 0.22689E+05 0.22689E+05 0.22689E+05 0.22689E+05
0.22689E+05
0.22689E+05 0.22689E+05 0.22689E+05 0.22689E+05 0.22689E+05
0.22689E+05
0.22689E+05 0.22689E+05 0.22689E+05 0.22689E+05 0.22689E+05
0.22689E+05
0.22689E+05 0.22689E+05 0.00000E+00 0.22689E+05 0.22689E+05
0.22689E+05
0.22689E+05 0.22689E+05 0.00000E+00 0.22689E+05 0.22689E+05
0.22689E+05
0.00000E+00 0.22689E+05 0.22689E+05 0.22689E+05 0.22689E+05
0.00000E+00
0.79875E+00
0.20158E+05 0.20158E+05 0.20158E+05 0.20158E+05 0.20158E+05
0.20158E+05
0.20158E+05 0.20158E+05 0.20158E+05 0.20158E+05 0.20158E+05
0.20158E+05
0.20158E+05 0.20158E+05 0.20158E+05 0.20158E+05 0.20158E+05
0.20158E+05
0.20158E+05 0.20158E+05 0.00000E+00 0.20158E+05 0.20158E+05
0.20158E+05

0.20158E+05 0.20158E+05 0.00000E+00 0.20158E+05 0.20158E+05
0.20158E+05
0.00000E+00 0.20158E+05 0.20158E+05 0.20158E+05 0.20158E+05
0.00000E+00
0.97625E+00
0.17573E+05 0.17573E+05 0.17573E+05 0.17573E+05 0.17573E+05
0.17573E+05
0.17573E+05 0.17573E+05 0.17573E+05 0.17573E+05 0.17573E+05
0.17573E+05
0.17573E+05 0.17573E+05 0.17573E+05 0.17573E+05 0.17573E+05
0.17573E+05
0.17573E+05 0.17573E+05 0.00000E+00 0.17573E+05 0.17573E+05
0.17573E+05
0.17573E+05 0.17573E+05 0.00000E+00 0.17573E+05 0.17573E+05
0.17573E+05
0.00000E+00 0.17573E+05 0.17573E+05 0.17573E+05 0.17573E+05
0.00000E+00
0.11537E+01
0.14769E+05 0.14769E+05 0.14769E+05 0.14769E+05 0.14769E+05
0.14769E+05
0.14769E+05 0.14769E+05 0.14769E+05 0.14769E+05 0.14769E+05
0.14769E+05
0.14769E+05 0.14769E+05 0.14769E+05 0.14769E+05 0.14769E+05
0.14769E+05
0.14769E+05 0.14769E+05 0.00000E+00 0.14769E+05 0.14769E+05
0.14769E+05
0.14769E+05 0.14769E+05 0.00000E+00 0.14769E+05 0.14769E+05
0.14769E+05
0.00000E+00 0.14769E+05 0.14769E+05 0.14769E+05 0.14769E+05
0.00000E+00
0.13312E+01
0.11466E+05 0.11466E+05 0.11466E+05 0.11466E+05 0.11466E+05
0.11466E+05
0.11466E+05 0.11466E+05 0.11466E+05 0.11466E+05 0.11466E+05
0.11466E+05
0.11466E+05 0.11466E+05 0.11466E+05 0.11466E+05 0.11466E+05
0.11466E+05
0.11466E+05 0.11466E+05 0.00000E+00 0.11466E+05 0.11466E+05
0.11466E+05
0.11466E+05 0.11466E+05 0.00000E+00 0.11466E+05 0.11466E+05
0.11466E+05

0.00000E+00 0.11466E+05 0.11466E+05 0.11466E+05 0.11466E+05
0.00000E+00
0.15087E+01
0.78878E+04 0.78878E+04 0.78878E+04 0.78878E+04 0.78878E+04
0.78878E+04
0.78878E+04 0.78878E+04 0.78878E+04 0.78878E+04 0.78878E+04
0.78878E+04
0.78878E+04 0.78878E+04 0.78878E+04 0.78878E+04 0.78878E+04
0.78878E+04
0.78878E+04 0.78878E+04 0.00000E+00 0.78878E+04 0.78878E+04
0.78878E+04
0.78878E+04 0.78878E+04 0.00000E+00 0.78878E+04 0.78878E+04
0.78878E+04
0.00000E+00 0.78878E+04 0.78878E+04 0.78878E+04 0.78878E+04
0.00000E+00
0.16862E+01
0.36450E+04 0.36450E+04 0.36450E+04 0.36450E+04 0.36450E+04
0.36450E+04
0.36450E+04 0.36450E+04 0.36450E+04 0.36450E+04 0.36450E+04
0.36450E+04
0.36450E+04 0.36450E+04 0.36450E+04 0.36450E+04 0.36450E+04
0.36450E+04
0.36450E+04 0.36450E+04 0.00000E+00 0.36450E+04 0.36450E+04
0.36450E+04
0.36450E+04 0.36450E+04 0.00000E+00 0.36450E+04 0.36450E+04
0.36450E+04
0.00000E+00 0.36450E+04 0.36450E+04 0.36450E+04 0.36450E+04
0.00000E+00

\$ iii iiiiiiiii-----iiiiiiiiii-----

- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7
- 8
- 9
- 10
- 11
- 12

13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53


```

36 1 56.1250
000
$ card 10
1 1.0 3.789E-05 1.4287E-02 1.4287E-02
1 1.0 3.789E-05 1.4287E-02 9.5247E-03
$-----+++++!!!!!!+++++!!!!!!_____!!!!!!+++++!!!!!!+++++))))))=====
32 33 39 42 43 44 48 49 50 52 53 54
56 0
1 1.0 4.878E-05 1.4287E-02 1.4287E-02
1 2 3 4 5 0
1 1.0 9.486E-06 4.7620E-03 4.7620E-03
6 0
$ card 12
0.00756 7.00E-04 10550 6550 0.0092
-6 -7 -8 -3 5200. 0
$ card 14
0 0 1 1 1 1 1 0 2 1
$ card 18
2
$ card 20
3 3 0
$ card 22 Heat transfer model
0 0 0 0 0 0
$ card 23
2 0
$ card 24
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1
$ card 26a
0.5 0.0 0.5 0.0
$ card 26b
3 0 0 0.0 0 0 0. 0. 0.
$ Card 27. Convergence Parameters
50 100 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0. 0
$ card 29
1565.05 4058. 15.7 0.0 0 0.0 0.00 0.0 1600. 0.0 0.0
$ card 30
0

```

\$ card 31

584.5584.35584.34584.31584.29585.39586.64586.63586.20586.86586.28586.8

8
586.2586.63585.58587.37587.59587.13587.47587.45587.64587.50587.63587.3

5
587.1587.18587.51587.52587.68587.63587.73585.27584.80586.45586.67587.0

5
586.4587.23584.75585.70585.81584.03584.27584.01584.04585.39585.05583.7

4
581.8582.39584.57580.52581.61581.65584.00583.62

\$ card 32

0

\$ card 36

0 0 3 0 0 0 0

مثال ۴-۸. برای قلب رآکتور بوشهر تغییرات چگالی خنک‌کننده را بر حسب ارتفاع مجتمع سوخت برای مجتمع سوخت گرم طی حادثه‌ی انسداد ۶۰ درصدی ورودی مجتمع، در دو حالت وجود ارتباط عرضی و نبود ارتباط عرضی بین مجتمع‌های سوخت ترسیم کنید.

ورودی برنامه:

فایل ورودی کد در این مثال در سی دی همراه کتاب در قالب فایل پی دی اف با نام پیوست یک آمده است.

انسداد در قلب رآکتور می‌تواند بر اثر ورود قطعات فلزی (شکست پره‌ی پمپ) به داخل مدار اول اتفاق بیفتد و سبب بسته شدن ورودی قلب رآکتور و کاهش جریان خنک‌کننده شود. در این کد نمی‌توان انسداد بر اثر تورم غلاف را مدل کرد. زیرا در تورم غلاف، کاهش سطح عبوری جریان در طولی از میله‌ی سوخت اتفاق می‌افتد و در ورودی کد صرفاً دبی جریان ورودی به جای سطح مسدود شده وارد می‌شود و نمی‌توان تغییرات سطح مقطع را نسبت به طول وارد کرد. این مدل‌سازی، تحلیل قلب است. در این جا ۱۶۳ مجتمع سوخت مشابه مدل شده است. در کارت شماره‌ی پنج، با توجه به متوسط توان خطی هر میله‌ی سوخت و با معلوم بودن فاکتور قله‌ی محوری و شعاعی توان در هر مجتمع می‌توان توزیع توان ورودی برای هر مجتمع را برای ۲۰ گره مفروض مسئله به‌دست آورد. اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه‌ی توان در گزارش تحلیل ایمنی نهایی نیروگاه اتمی بوشهر فصل‌های ۴ و ۱۵ در دسترس است. پس از تعریف توان‌ها نحوه‌ی ارتباط مجتمع‌های سوخت وارد می‌شود. ۳۱۱ میله‌ی سوخت در هر مجتمع سوخت نیروگاه اتمی بوشهر وجود دارد. بنابراین، تعداد ۳۱۱ میله در کارت شماره‌ی ۱۰ وارد می‌شود. در کارت ۱۲ اطلاعات

میله‌ی سوخت داده شده است. برای این که بتوانیم انسداد ۶۰ درصدی را در این حالت مدل کنیم باید جریان سیال ورودی به مجتمع سوخت شماره‌ی ۱۱ را به اندازه‌ی ۶۰ درصد کم کرده و این مقدار را بر روی بقیه‌ی مجتمع‌های سوخت توزیع کنیم. دلیل این توزیع جریان بر روی مجتمع‌های دیگر آن است که دبی کلی ورودی به قلب رآکتور باید ثابت باشد. عدد پنجم در کارت شماره‌ی ۱۴، باید یک قرار داده شود تا کارت شماره‌ی ۲۳ فعال شود. عدد اول در کارت ۲۳، دو قرار داده می‌شود تا در کارت شماره‌ی ۲۴ توزیع دبی جریان برای هر ۱۶۳ مجتمع تعریف شود. این اعداد در دبی جرمی سیال (۴۰۵۸ کیلوگرم بر مترمربع ثانیه) ضرب می‌شوند تا دبی ورودی هر مجتمع تعیین شود. مثلاً برای مدل‌سازی انسداد ۶۰ درصدی در مجتمع سوخت شماره‌ی ۱۱، این عدد ۰٫۴ قرار داده می‌شود؛ یعنی ۴۰ درصد سیال از این مجتمع عبور می‌کند و مابقی به دلیل انسداد به صورت متقارن بر روی شش مجتمع کناری پخش می‌شود. برای مجتمع‌های مجاور مجتمع مسدود شده ضرب ۱/۱ وارد می‌شود. بقیه‌ی کارت‌ها نیز مطابق توضیحات ارائه شده در مثال‌های قبلی است که در آن‌ها دمای ورودی، فشار سیستم و دبی جرمی سیال وارد می‌شوند.

در حالت دوم که بخواهیم ارتباط عرضی بین مجتمع‌های سوخت را لحاظ نکنیم در کارت شماره‌ی ۷ ارتباط بین همه‌ی کانال‌ها را حذف می‌کنیم. در کارت ۷ که ارتباط کانال‌ها با هم دیگر را وارد کرده‌ایم جلوی هر کانال عددی باید قرار داده نشود تا کد تشخیص دهد که ارتباط بین کانال‌ها حذف شده است.

\$ CARD 7	18
1	19
2	20
3	21
4	22
5	23
6	24
7	25
8	26
9	27
10	28
11	29
12	30
13	31
14	32
15	33
16	34
17	35

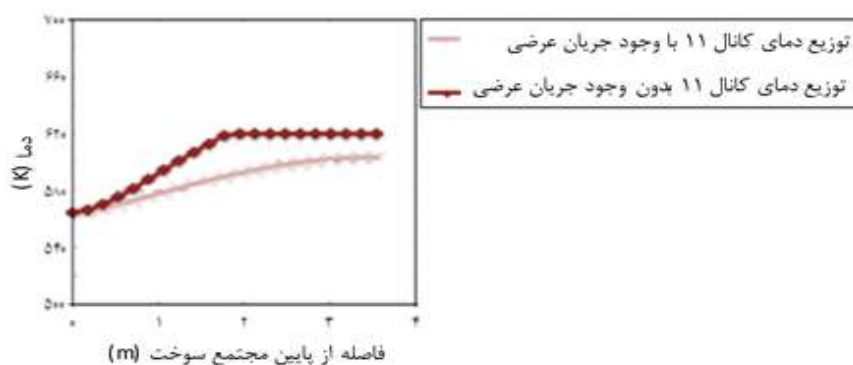
36	77
37	78
38	79
39	80
40	81
41	82
42	83
43	84
44	85
45	86
46	87
47	88
48	89
49	90
50	91
51	92
52	93
53	94
54	95
55	96
56	97
57	98
58	99
59	100
60	101
61	102
62	103
63	104
64	105
65	106
66	107
67	108
68	109
69	110
70	111
71	112
72	113
73	114
74	115
75	116
76	117

118	159
119	160
120	161
121	162
122	163
123	
124	
125	
126	
127	
128	
129	
130	
131	
132	
133	
134	
135	
136	
137	
138	
139	
140	
141	
142	
143	
144	
145	
146	
147	
148	
149	
150	
151	
152	
153	
154	
155	
156	
157	
158	

نکته: همهی این اعداد باید در یک ستون به دنبال هم وارد شوند.

خروجی برنامه:

شکل ۴-۲۲ تغییرات دمای محوری سیال خنک‌کننده را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۴-۲۲ در صورتی که ارتباط عرضی بین مجتمع‌های سوخت برقرار باشد دمای سیال به دلیل اختلاط، تغییری نمی‌کند؛ اما در صورتی که ارتباط عرضی نداشته باشد دمای سیال تغییرات چشم‌گیری را نشان می‌دهد و از نیمه‌ی قلب رآکتور به بالا دمای سیال به دمای اشباع می‌رسد.



شکل ۴-۲۲. توزیع دمایی محوری بر حسب ارتفاع مجتمع سوخت.

مثال ۴-۹. کانال آبی به طول ۲ متر و قطر ۱۵/۴ میلی‌متر مفروض است. فشار در طول کانال برابر با ۴۵ بار بوده و آب در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد زیر اشباع و با دبی جرمی ۹۰۰ کیلوگرم بر مترمربع بر ثانیه وارد می‌شود. در صورتی که شار حرارتی ثابتی به میزان ۵۷۰ کیلووات بر مترمربع بر این کانال اعمال شود، منحنی تغییرات کسر بخار را بر حسب آنتالپی ترسیم کنید.

ورودی برنامه:

```

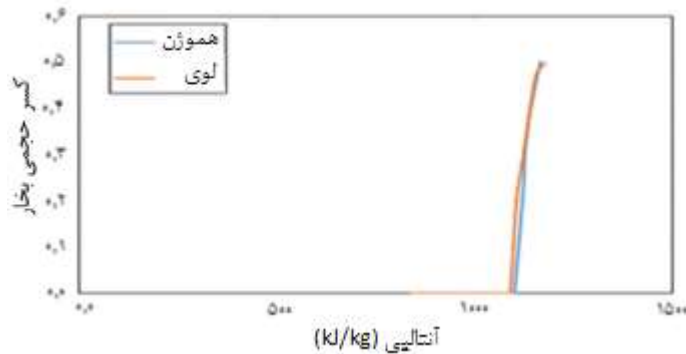
pipe
$ Three-equation model with homogeneous void model - Upflow solution
$ card 2
0 2 2 0
$ card 3
1 1 0 20 1 0 0 0 0 0 3 1
$ card 4
-0.10000
$ card 5
20
0.05000
    
```

27577.90
0.15000
27577.90
0.25000
27577.90
0.35000
27577.90
0.45000
27577.90
0.55000
27577.90
0.65000
27577.90
0.75000
27577.90
0.85000
27577.90
0.95000
27577.90
1.05000
27577.90
1.15000
27577.90
1.25000
27577.90
1.35000
27577.90
1.45000
27577.90
1.55000
27577.90
1.65000
27577.90
1.75000
27577.90
1.85000
27577.90
1.95000
27577.90
1
00 00

\$ card 10
 1 1.0 1.863E-4 0.0484 0.0484 1 1
 \$ card 12
 0.00756 7.00E-04 10550 6550 0.0092
 -6 -7 -8 -3 5200. 0
 \$ card 14
 0 0 1 1 1 1 1 0 1 0
 \$ card 18
 2
 \$ card 20
 2 3 0
 \$ card 22
 0 0 0 0 0 0
 \$ card 23
 0 0
 \$ card 26a
 0.5 0.0 0.5 0.0
 \$ card 26b
 3 0 0 0.0 0 0 0. 0. 0.
 \$ card 27
 20 100 0.01 0.05 0.8 0.8 -1 +4 30 0.01 0.001 2
 \$ card 29
 1470.35 900. 4.5 0.0 0 0.0 0.00 0.0000.0 0.0 0.0
 .0
 0 0 0 0 0
 \$ card 36
 0 0 0 0 0 0 0

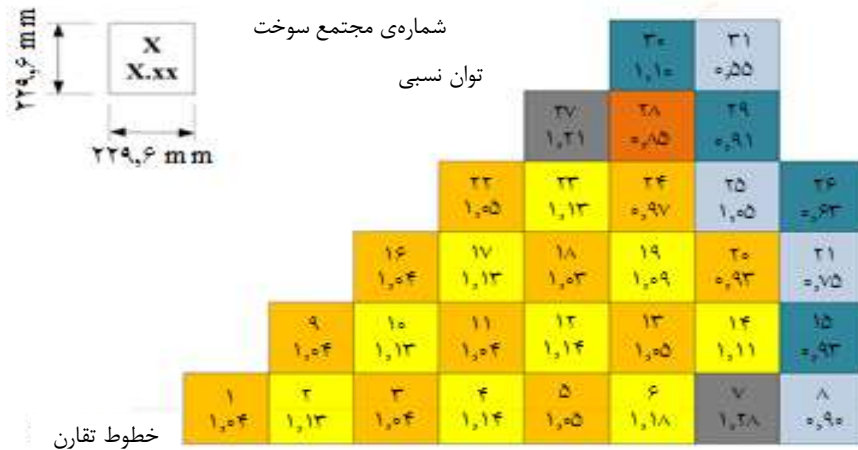
این مسئله به دو صورت تحلیل زیر کانال و تحلیل قلب قابل حل است. در این جا از روش تحلیل قلب استفاده شده است. کارت یک مربوط به توضیحات مسئله است. کارت دو، مشخص کننده ی این است که مسئله به روش تحلیل قلب حل شود و واحدهای ورودی و خروجی در سیستم SI است و از مدل ترموهیدرولیکی سه معادله ای استفاده شده است. در کارت سه کانال باز در نظر گرفته شده و تعداد کل کانال ها یک و هیچ میله ی سوختی وجود ندارد و ۲۰ گره در راستای محوری لحاظ شده است و گره ای در راستای شعاعی فرض نشده است چون با یک کانال سروکار داریم. کارت های ۴، ۵، ۶ و ۷ مطابق مثال های قبلی است. در این مسئله میله ی سوخت نداریم؛ اما کارت ۱۲ باید وارد شود. در صورت نبود این کارت کد اجرا نخواهد شد و این کارت جز ضروریات کد است. اطلاعات هر میله ی سوخت را می توان در این جا وارد کرد. نهایتاً شار جرمی سیال، فشار سیستم و دمای ورودی سیال در کارت های بعدی وارد می شوند.

خروجی برنامه:

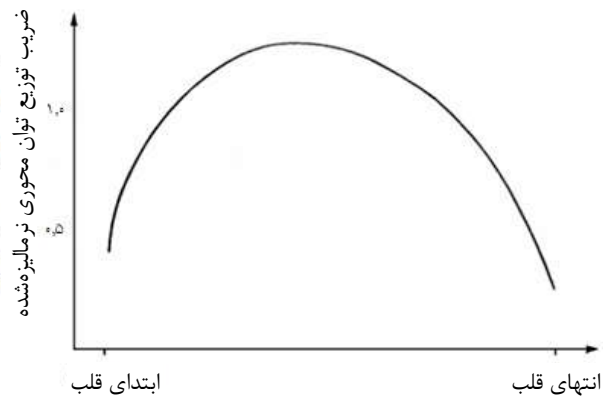


شکل ۴-۲۳. تغییرات کسر حجمی بخار بر حسب آنتالپی.

با توجه به شکل ۴-۲۳ نتایج برای دو مدل لوی و مدل هموزن ارایه شده است. برای بررسی بیش تر نتایج حاصل از سایر مدل ها می توان عدد اول در کارت شماره ی ۲۰ را تغییر داد. مثال ۴-۱۰. برای رآکتور طرح آلمانی (KWU) نیروگاه اتمی بوشهر با مشخصات ارایه شده در شکل های ۴-۲۴، ۴-۲۵ و جدول ۴-۸، توزیع دمای سیال در کانال گرم را در طول مجتمع سوخت ترسیم کنید.



شکل ۴-۲۴. تقارن یک هشتم رآکتور KWU.



شکل ۴-۲۵. ضریب توزیع توان محوری بر حسب ارتفاع قلب رآکتور.
جدول ۴-۸. پارامترهای ترموهیدرولیکی رآکتور.

پارامتر	مقدار
فشار	۱۵٫۸ MPa
دمای ورودی خنک‌کننده	۲۹۱٫۳ °C
متوسط توان خطی میله‌ی سوخت	۲۰۷٫۹ W/cm
طول مجتمع سوخت	۳٫۹ m
تعداد مجتمع‌های سوخت	۱۹۳
تعداد میله‌های سوخت در هر مجتمع	۲۳۶
قطر قرص سوخت	۹٫۱۱ mm
قطر میله‌ی سوخت	۱۰٫۸ mm

ورودی برنامه:

KWU CORE BURNUP OF 0 MWD/T -34 FUEL ASSEMBLIES OR CHANNELS

\$

\$ card 2

0 2 2 0

\$ card 3

1 31 0 20 3 0 0 6 0 0 0 1

\$ card 4

-0.19500

\$ card 5

20

0.0975

3.1637E+06 3.4374E+06 3.1637E+06 3.4679E+06 3.1941E+06
3.5896E+06
3.8938E+06 2.7380E+06 3.1637E+06 3.4374E+06 3.1637E+06
3.4679E+06
3.1941E+06 3.3766E+06 2.8291E+06 3.1637E+06 3.4374E+06
3.1332E+06
3.3158E+06 2.8391E+06 2.2815E+06 3.1941E+06 3.4374E+06
2.9507E+06
3.1941E+06 1.9165E+06 3.6808E+06 2.5857E+06 2.7682E+06
3.3462E+06
1.6731E+06
0.2925
4.2352E+06 4.6018E+06 4.2352E+06 4.6425E+06 4.2760E+06
4.8054E+06
5.2126E+06 3.6651E+06 4.2352E+06 4.6018E+06 4.2352E+06
4.6425E+06
4.2760E+06 4.5203E+06 3.7873E+06 4.2352E+06 4.6018E+06
4.1945E+06
4.4389E+06 3.7873E+06 3.0543E+06 4.2760E+06 4.6018E+06
3.9502E+06
4.2760E+06 2.5656E+06 4.9275E+06 3.4615E+06 3.7058E+06
4.4796E+06
2.2398E+06
0.4875
4.8986E+06 5.3225E+06 4.8986E+06 5.3696E+06 4.9457E+06
5.5580E+06
6.0290E+06 4.2392E+06 4.8986E+06 5.3225E+06 4.8986E+06
5.3696E+06
4.9457E+06 5.2283E+06 4.3804E+06 4.8986E+06 5.3225E+06
4.8515E+06
5.1341E+06 4.3804E+06 3.5326E+06 4.9457E+06 5.3225E+06
4.5689E+06
4.9457E+06 2.9674E+06 5.6993E+06 4.0037E+06 4.2863E+06
5.1812E+06
2.5906E+06
0.6825
5.5109E+06 5.9878E+06 5.5109E+06 6.0408E+06 5.5639E+06
6.2528E+06
6.7827E+06 4.7691E+06 5.5109E+06 5.9878E+06 5.5109E+06
6.0408E+06

5.5639E+06 5.8818E+06 4.9280E+06 5.5109E+06 5.9878E+06
5.4579E+06
5.7759E+06 4.9280E+06 3.9742E+06 5.5639E+06 5.9878E+06
5.1400E+06
5.5639E+06 3.3383E+06 6.4117E+06 4.5041E+06 4.8220E+06
5.8288E+06
2.9144E+06
0.8775
5.8681E+06 6.3759E+06 5.8681E+06 6.4323E+06 5.9245E+06
6.6580E+06
7.2222E+06 5.0782E+06 5.8681E+06 6.3759E+06 5.8681E+06
6.4323E+06
5.9245E+06 6.2631E+06 5.2474E+06 5.8681E+06 6.3759E+06
5.8117E+06
6.1502E+06 5.2474E+06 4.2318E+06 5.9245E+06 6.3759E+06
5.4731E+06
5.9245E+06 3.5547E+06 6.8273E+06 4.7960E+06 5.1346E+06
6.2066E+06
3.1033E+06
1.0725
6.2253E+06 6.7640E+06 6.2253E+06 6.8239E+06 6.2852E+06
7.0633E+06
7.6619E+06 5.3873E+06 6.2253E+06 6.7640E+06 6.2253E+06
6.8239E+06
6.2852E+06 6.6443E+06 5.5668E+06 6.2253E+06 6.7640E+06
6.1654E+06
6.5246E+06 5.5668E+06 4.4894E+06 6.2852E+06 6.7640E+06
5.8063E+06
6.2852E+06 3.7711E+06 7.2429E+06 5.0880E+06 5.4471E+06
6.5844E+06
3.2922E+06
1.2675
6.4294E+06 6.9858E+06 6.4294E+06 7.0476E+06 6.4912E+06
7.2949E+06
7.9131E+06 5.5639E+06 6.4294E+06 6.9858E+06 6.4294E+06
7.0476E+06
6.4912E+06 6.8621E+06 5.7494E+06 6.4294E+06 6.9858E+06
6.3676E+06
6.7385E+06 5.7494E+06 4.6366E+06 6.4912E+06 6.9858E+06
5.9966E+06

6.4912E+06 3.8947E+06 7.4804E+06 5.2548E+06 5.6257E+06
6.8003E+06
3.4002E+06
1.4625
6.5825E+06 7.1521E+06 6.5825E+06 7.2154E+06 6.6458E+06
7.4686E+06
8.1015E+06 5.6964E+06 6.5825E+06 7.1521E+06 6.5825E+06
7.2154E+06
6.6458E+06 7.0255E+06 5.8863E+06 6.5825E+06 7.1521E+06
6.5192E+06
6.8990E+06 5.8863E+06 4.7470E+06 6.6458E+06 7.1591E+06
6.1394E+06
6.6458E+06 3.9875E+06 7.6585E+06 5.3799E+06 5.7597E+06
6.9622E+06
3.4811E+06
1.6575
6.5315E+06 7.0967E+06 6.5315E+06 7.1595E+06 6.5943E+06
7.4107E+06
8.0387E+06 5.6522E+06 6.5315E+06 7.0967E+06 6.5315E+06
7.1595E+06
6.5943E+06 6.9711E+06 5.8406E+06 6.5315E+06 7.0967E+06
6.4687E+06
6.8455E+06 5.8406E+06 4.7102E+06 6.5943E+06 7.0967E+06
6.0918E+06
6.5943E+06 3.9566E+06 7.5991E+06 5.3382E+06 5.7150E+06
6.9083E+06
3.4541E+06
1.8525
6.4294E+06 6.9858E+06 6.4294E+06 7.0476E+06 6.4912E+06
7.2949E+06
7.9131E+06 5.5639E+06 6.4294E+06 6.9858E+06 6.4294E+06
7.0476E+06
6.4912E+06 6.8621E+06 5.7494E+06 6.4294E+06 6.9858E+06
6.3676E+06
6.7385E+06 5.7494E+06 4.6366E+06 6.4912E+06 6.9858E+06
5.9966E+06
6.4912E+06 3.8947E+06 7.4804E+06 5.2548E+06 5.6257E+06
6.8003E+06
3.4002E+06
2.0475

6.3787E+06 6.9306E+06 6.3787E+06 6.9920E+06 6.4400E+06
7.2373E+06
7.8506E+06 5.5199E+06 6.3787E+06 6.9306E+06 6.3205E+06
6.9920E+06
6.4400E+06 6.8080E+06 5.7039E+06 6.3787E+06 6.9306E+06
6.3173E+06
6.6853E+06 5.7039E+06 4.6000E+06 6.4400E+06 6.9306E+06
5.9493E+06
6.4400E+06 3.8640E+06 7.4213E+06 5.2133E+06 5.5813E+06
6.7466E+06
3.3733E+06
2.2425
6.2256E+06 6.7643E+06 6.2256E+06 6.8242E+06 6.2854E+06
7.0636E+06
7.6622E+06 5.3874E+06 6.2256E+06 6.7643E+06 6.1688E+06
6.8242E+06
6.2854E+06 6.6446E+06 5.5670E+06 6.2256E+06 6.7643E+06
6.1657E+06
6.5249E+06 5.5670E+06 4.4896E+06 6.2854E+06 6.7643E+06
5.8065E+06
6.2854E+06 3.7713E+06 7.2432E+06 5.0881E+06 5.4473E+06
6.5644E+06
3.2923E+06
2.4375
5.9703E+06 6.4870E+06 5.9703E+06 6.5444E+06 6.0277E+06
6.7740E+06
7.3480E+06 5.1665E+06 5.9703E+06 6.4870E+06 5.9159E+06
6.5444E+06
6.0277E+06 6.3722E+06 5.3388E+06 5.9703E+06 6.4870E+06
5.9129E+06
6.2574E+06 5.3388E+06 4.3055E+06 6.0277E+06 6.4870E+06
5.5684E+06
6.0277E+06 3.6167E+06 6.9462E+06 4.8795E+06 5.2240E+06
6.2953E+06
3.1573E+06
2.6325
5.7136E+06 6.2081E+06 5.7136E+06 6.2630E+06 5.7685E+06
6.4827E+06
7.0320E+06 4.9443E+06 5.7136E+06 6.2081E+06 5.6615E+06
6.2630E+06

5.7685E+06 6.0892E+06 5.1092E+06 5.7136E+06 6.2081E+06
5.6586E+06
5.9883E+06 5.1092E+06 4.1204E+06 5.7685E+06 6.2081E+06
5.3290E+06
5.7685E+06 3.4612E+06 6.6440E+06 4.6697E+06 4.9994E+06
6.0246E+06
3.0215E+06
2.8275
5.3594E+06 5.8232E+06 5.3594E+06 5.8747E+06 5.4109E+06
6.0808E+06
6.5960E+06 4.6378E+06 5.3594E+06 5.8232E+06 5.3105E+06
5.8747E+06
5.4109E+06 5.7201E+06 4.7924E+06 5.3594E+06 5.8232E+06
5.3078E+06
5.6170E+06 4.7924E+06 3.8649E+06 5.4109E+06 5.8232E+06
4.9986E+06
5.4109E+06 3.2466E+06 6.2321E+06 4.3802E+06 4.6894E+06
5.6511E+06
2.8342E+06
3.0225
4.8503E+06 5.2700E+06 4.8502E+06 5.3166E+06 4.8969E+06
5.5031E+06
5.9694E+06 4.9172E+06 4.8503E+06 5.2700E+06 4.8060E+06
5.3166E+06
4.8969E+06 5.1767E+06 4.3371E+06 4.8502E+06 5.2700E+06
4.8036E+06
5.0834E+06 4.3371E+06 3.4977E+06 4.8969E+06 5.2700E+06
4.5237E+06
4.8969E+06 2.9382E+06 5.6401E+06 3.9641E+06 4.2439E+06
5.1142E+06
2.5650E+06
3.2175
4.3410E+06 4.7170E+06 4.3410E+06 4.7584E+06 4.3827E+06
4.9253E+06
5.3426E+06 3.7565E+06 4.3410E+06 4.7170E+06 4.3014E+06
4.7584E+06
4.3827E+06 4.6332E+06 3.8817E+06 4.3410E+06 4.7170E+06
4.2992E+06
4.5496E+06 3.8817E+06 3.1304E+06 4.3827E+06 4.7170E+06
4.0487E+06

4.3827E+06 2.6297E+06 5.0479E+06 3.5479E+06 3.7983E+06
 4.5772E+06
 2.2957E+06
 3.4125
 3.6768E+06 3.9953E+06 3.6768E+06 4.0304E+06 3.7122E+06
 3.3247E+06
 4.5252E+06 3.1819E+06 3.6768E+06 3.9953E+06 3.6433E+06
 4.0304E+06
 3.7122E+06 3.9243E+06 3.2878E+06 3.6768E+06 3.9953E+06
 3.6414E+06
 3.8535E+06 3.2878E+06 2.6514E+06 3.7122E+06 3.9953E+06
 3.4292E+06
 3.7122E+06 2.2274E+06 4.2756E+06 3.0051E+06 3.2172E+06
 3.8769E+06
 1.9446E+06
 3.6075
 2.8091E+06 3.0524E+06 2.8091E+06 3.0793E+06 2.8361E+06
 2.5401E+06
 3.4573E+06 2.4308E+06 2.8091E+06 3.0524E+06 2.7835E+06
 3.0792E+06
 2.8361E+06 2.9982E+06 2.5119E+06 2.8091E+06 3.0524E+06
 2.7820E+06
 3.2639E+06 2.5119E+06 2.0257E+06 2.8361E+06 3.0524E+06
 2.6200E+06
 2.8361E+06 1.7017E+06 3.2666E+06 2.2959E+06 2.4579E+06
 2.9620E+06
 1.4857E+06
 3.8025
 1.6855E+06 1.8314E+06 1.6855E+06 1.8476E+06 1.7017E+06
 1.5241E+06
 2.0744E+06 1.4585E+06 1.6855E+06 1.8314E+06 1.6701E+06
 1.8475E+06
 1.7017E+06 1.7989E+06 1.5071E+06 1.6855E+06 1.8314E+06
 1.6692E+06
 1.9583E+06 1.5071E+06 1.2154E+06 1.7017E+06 1.8314E+06
 1.5720E+06
 1.7017E+06 1.0210E+06 1.9600E+06 1.3775E+06 1.4747E+06
 1.7772E+06
 0.8914E+06
 1 -2.2296 .2296
 2 -3.2296 .2296 9.2296 .2296

3 -4.2296 .2296 10.2296 .2296
 4 -5.2296 .2296 11.2296 .2296
 5 -6.2296 .2296 12.2296 .2296
 6 -7.2296 .2296 13.2296 .2296
 7 -8.2296 .2296 14.2296 .2296
 8 15.2296 .2296
 9 10.2296 .2296
 10 11.2296 .2296 16.2296 .2296
 11 12.2296 .2296 17.2296 .2296
 12 13.2296 .2296 18.2296 .2296
 13 14.2296 .2296 19.2296 .2296
 14 15.2296 .2296 20.2296 .2296
 15 21.2296 .2296
 16 17.2296 .2296
 17 18.2296 .2296 22.2296 .2296
 18 19.2296 .2296 23.2296 .2296
 19 20.2296 .2296 24.2296 .2296
 20 21.2296 .2296 25.2296 .2296
 21 26.2296 .2296
 22 23.2296 .2296
 23 24.2296 .2296 27.2296 .2296
 24 25.2296 .2296 28.2296 .2296
 25 26.2296 .2296 29.2296 .2296
 26
 27 28.2296 .2296
 28 29.2296 .2296 30.2296 .2296
 29 31.2296 .2296
 30 31.2296 .2296
 31

00 00

\$ card 10

1 1.0 0.02902 8.6457 7.9702 236. 1
 1 0.5 0.02902 8.6457 7.9702 236. 1
 2 3 4 5 6 7 8 9 16 22 27 30
 0
 1 0.125 0.02902 8.6457 7.9702 236. 1
 1

\$ card 12

0.00911 7.20E-04 10550 6550 0.0108
 -6 -7 -8 -3 5300.0

\$ card 14

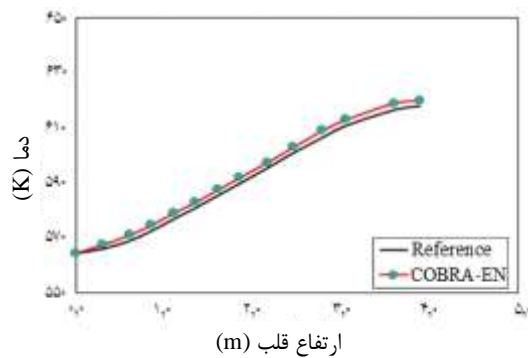
```

0 0 1 1 1 1 1 0 1 0
$ card 18
2
$ card 20
3 3 0
$ card 22
0 0 0 0 0 0
$ card 23
2 0
$ card 24
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
1 1 1 1 1 1 1
$ card 26a
0.5 0.0 0.5 0.0
$ card 26b
3 0 0 0.0 0 0 0. 0. 0.
$ card 27
50 100 0.01 0.05 0.8 0.8 -1 +4 30 0.01 0.001 2
$ card 29
1564.453156 15.8 0.0 0 0.0 0.05 0. 0. 0 0.0
0. 0 0
0 0 0 0 0
$ card 36
0 0 0 0 2 0 0

```

خروجی برنامه:

شکل ۴-۲۶ تغییرات توزیع دمای سیال را در کانال گرم بر حسب ارتفاع قلب راکتور نشان می‌دهد.



شکل ۴-۲۶. توزیع دمای سیال در کانال گرم در طول قلب راکتور.

۲-۴ خلاصه و جمع‌بندی مطالب فصل

در این فصل سعی شد خواننده با نحوه‌ی نوشتن ورودی و تحلیل خروجی کد آشنا شود. هم‌چنین این مسایل کاربردهای مختلف کد را در تحلیل ترموهیدرولیکی رفتار سیال خنک‌کننده در شرایط مختلف نشان داد.

لازم به ذکر است که کد COBRA-EN برای تحلیل ترموهیدرولیکی رفتار خنک‌کننده و میله‌های سوخت در رآکتورهای توپر غربی طراحی شده است. برای استفاده از این کد برای رآکتورهای VVER^{۱۰۰۰} نیاز است تا اصلاحاتی در کد اعمال شود. برای این منظور، در فصل پنجم ابتدا نقاط ضعف کد COBRA-EN در تحلیل رآکتورهای VVER^{۱۰۰۰} بررسی و سپس سعی شده با معرفی و اعمال اصلاحاتی در کد این ضعف‌ها مرتفع شوند.

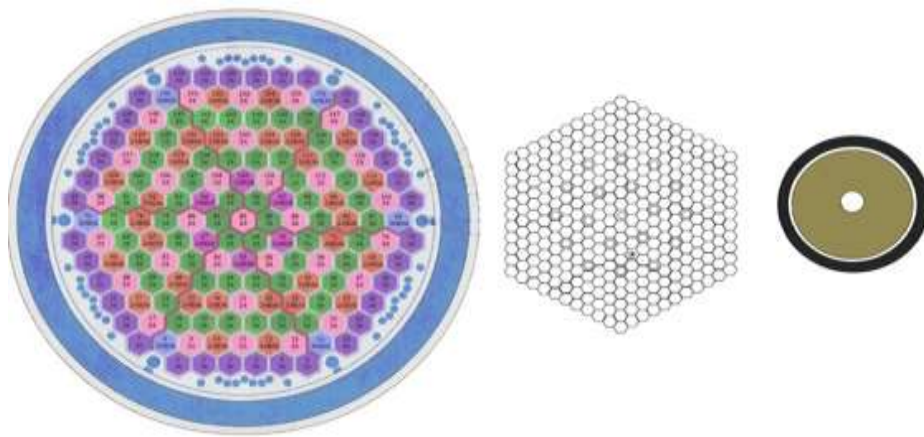
۳-۴ مراجع

۱. پایان‌نامه کارشناسی، بررسی اثر ورود اشیا فلزی در مدار اول نیروگاه اتمی بوشهر با استفاده از کدهای RELAP5/MOD3.2 و COBRA-EN، رحمان قراری، (۱۳۹۴).

۲. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، محاسبات ترموهیدرولیکی قلب رآکتور هسته‌ای بوشهر-VVER (1000 با استفاده از کوپل کدهای COBRA-EN، WIMS و CITATION، امیرحسین صفاری نوش آبادی، (۱۳۸۷).

3. FSAR (Final Safety Analysis Report), BNPP, chapters 4, 15, Atomic Energy Organization of Iran NPP Bushehr Unit 1, (2003).

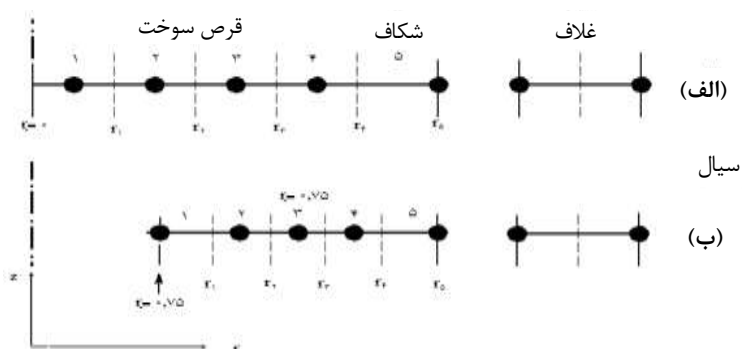
4. PSAR (Preliminary Safety Analysis Report) Nuclear Power plant Iran1, 2, Prepared for AEOI by KWU, (1976).



شکل ۵-۲. میله‌ی سوخت، مجتمع سوخت و قلب رآکتور روسی.

۵-۱-۱ اصلاح متن کد COBRA-EN با در نظر گرفتن حفره‌ی مرکزی سوخت

کد COBRA-EN برای رآکتورهای آب تحت فشار غربی با سوخت توپر است در حالی که سوخت رآکتور هسته‌ای بوشهر حفره‌ای مرکزی به قطر ۱٫۵ mm دارد. برای رفع این مشکل باید متن کد اصلاح شود. در کد COBRA-EN چند مدل حرارتی سوخت وجود دارد که مهم‌ترین آن مدل اصلاح‌شده‌ی COBRA-3C است. در هر بازه‌ی محوری، معادلات هدایت حرارتی به روش تفاضل محدود فقط در جهت شعاعی حل می‌شوند. خواص میله‌ی سوخت از جمله چگالی، ضربه هدایت حرارتی و گرمای ویژه‌ی زیرکالوی و اورانیم اکسید را هم می‌توان ثابت یا وابسته به درجه حرارت در نظر گرفت. برنامه‌ی اصلی کد COBRA منطبق بر شکل ۵-۳ الف، برای سوخت توپر ارایه شده است. برای اصلاح و استفاده از کد COBRA برای سوخت مرکز خالی، زیربرنامه‌ی TEMP در متن این کد طبق شکل ۵-۳ ب اصلاح شده است. توجه شود که در این حالت گره شماره‌ی یک روی سطح حفره‌ی مرکزی در نظر گرفته شده و هیچ تبادل حرارتی از سمت حفره‌ی مرکزی وجود ندارد. این اصلاحات در سایر روش‌های محاسبات حرارتی سوخت (CRTN و TWIGL) فعلاً اعمال نشده است. تغییرات اعمال شده در کد شامل گره‌بندی، حجم‌بندی جدید و شرط مرزی عایق در سطح حفره‌ی مرکزی میله‌ی سوخت است. اصلاح محاسبات دمایی بر دیگر پارامترهای ترموهیدرولیکی تأثیرگذار است. با در نظر گرفتن حفره در داخل میله‌ی سوخت، مکان بیشینه دمای سوخت جابه‌جا می‌شود و تأثیراتی در سایر پارامترهای ترموهیدرولیکی می‌گذارد. نتایج اصلاح محاسبه‌ی دما با گزارش تحلیل ایمنی نهایی رآکتور بوشهر مقایسه شده است و تطابق خوبی نشان داده است.



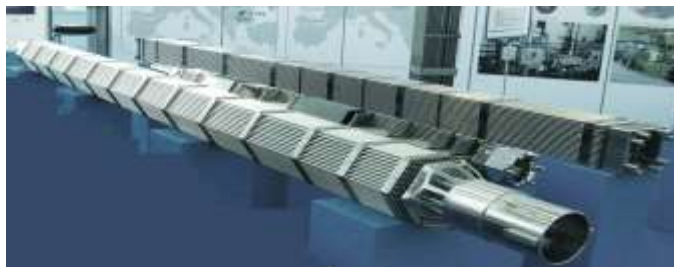
شکل ۳-۵. نحوه‌ی در نظر گرفتن گره‌های شعاعی برای حل عددی مدل هدایت حرارتی سوخت.

۲-۱-۵ رفع محدودیت تعداد صفحات مشبک با اصلاح متن کد COBRA-EN

تعداد صفحات مشبک قابل مدل در کد حداکثر ۱۰ عدد بود که برای رآکتورهای غربی به همین تعداد است. این در حالی است که رآکتورهای روسی VVER ۱۰۰۰ پانزده صفحه‌ی مشبک دارند لذا با بررسی و دنبال کردن پارامترهای مربوط به صفحه‌ی مشبک در کارت شماره‌ی سه در متن برنامه‌ی کد این محدودیت برطرف شد و حداکثر تعداد قابل تعریف تا ۱۵ عدد افزایش یافت. تغییرات به این صورت اعمال شد که در زیربرنامه‌ی COBRA۲، ابعاد پارامتر GRIDXL از ۱۰ به ۱۵ افزایش یافته و تغییراتی در زیربرنامه‌ی CHAN برای خواندن صحیح فایل ورودی انجام گرفت.

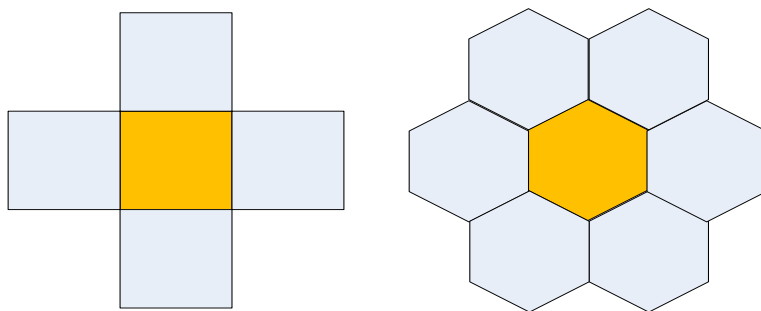
۳-۱-۵ رفع مشکل هندسه

در شکل ۴-۵، نمایی از مجتمع‌های سوخت رآکتورهای آب تحت فشار غربی و روسی نشان داده شده‌است. مجتمع‌های سوخت رآکتورهای آبی تحت فشار غربی مربعی و مجتمع‌های سوخت رآکتورهای آب تحت فشار روسی شش‌وجهی هستند.

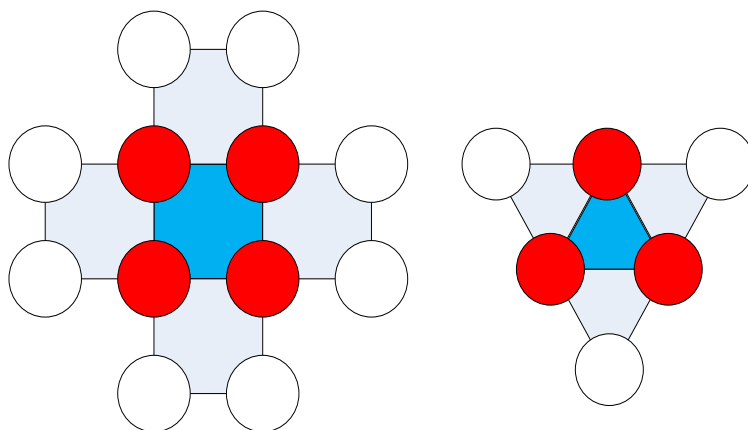


شکل ۴-۵. نمایش مجتمع‌های سوخت رآکتورهای آب تحت فشار غربی و روسی.

اساساً تعریف هندسه‌ی مربعی یا مثلثی با توجه به پارامترهای ترموهیدرولیکی فشرده (محیط ترشده، گرم‌شده و سطح عبوری سیال) در کارت ۱۰ فرق چندانی نمی‌کند. هم‌چنین به طور عادی تعداد کانال‌های مجاور قابل تعریف در کارت هفت در دو حالت مدل‌سازی قلب رآکتور و مجتمع سوخت برابر با شش است. لذا محدودیت خاصی در تعریف هندسه وجود ندارد (شکل ۵-۵). هم‌چنین برای تکمیل کارت ۸ در حالت مدل‌سازی مجتمع سوخت که ارتباط هر میله با کانال‌های مجاورش تعریف می‌شود در حالت عادی تا ۶ کانال مجاور قابل تعیین است لذا مشکلی در این زمینه وجود ندارد (شکل ۶-۵).



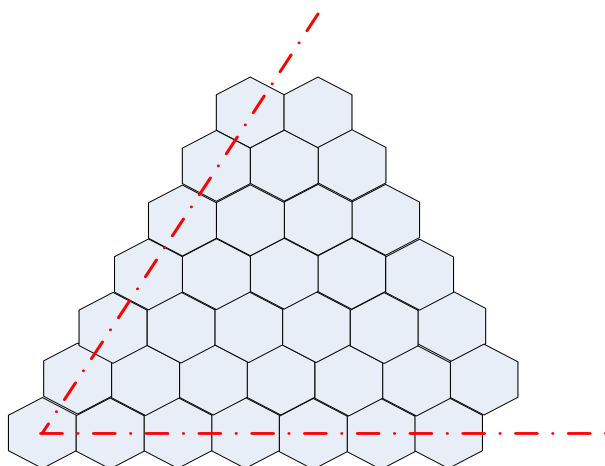
شکل ۵-۵. نمایش کانال‌های مجاور در حالت تحلیل قلب رآکتور در دو نوع رآکتور آب تحت فشار غربی و روسی.



شکل ۶-۵. نمایش کانال‌های مجاور در حالت تحلیل مجتمع سوخت در دو نوع رآکتور آب تحت فشار غربی و روسی.

۴-۱-۵ انتخاب خط تقارن برای مدل‌سازی قلب راکتور

استفاده از خط تقارن در مدل‌سازی مجتمع و قلب راکتور منجر به کاهش حجم ورودی کد، کاهش دامنه‌ی محاسباتی و کاهش زمان اجرای کد می‌شود. برای مدل‌سازی قلب راکتورهای روسی می‌توان با انتخاب خط تقارن به صورت شکل ۷-۵ و در نظر گرفتن علامت‌های منفی در جای مناسب در تعریف کارت ۷ از این مزیت استفاده کرد.



شکل ۷-۵. نمایش نحوه‌ی در نظر گرفتن صحیح خط تقارن در مدل‌سازی یک ششم قلب راکتور هسته‌ای.

۵-۱-۵ انتخاب نوع غلاف

نکته‌ی مهم دیگر استفاده از غلاف‌هایی با جنس مختلف در کد است. این کد بر مبنای غلاف زیرکونیمی طراحی شده است و می‌توان تغییرات ضریب هدایت حرارتی غلاف را فقط برای غلاف زیرکونیوم در دماهای مختلف وارد کرد. در صورتی که بخواهیم از سایر غلاف‌ها استفاده کنیم یا باید یک مقدار متوسط برای ضریب هدایت حرارتی در نظر بگیریم یا باید معادله‌ی تغییر ضریب هدایت حرارتی غلاف بر حسب دما در فایل منبع کد داده شود. این مشکل نیز در این کد برطرف و کد اصلاح‌شده علاوه بر غلاف زیرکونیمی برای غلاف آلومینیمی نیز قابل استفاده است.

تغییرات ظاهری اعمال شده در ورودی کد بعد از اصلاحات انجام گرفته به این صورت است که در کارت شماره‌ی دو عدد پنجم قطر حفره‌ی مرکزی میله‌ی سوخت توخالی است که با توجه به تغییرات داده شده به کد اضافه شده است. همچنین تعداد صفحات مشبک نگه‌دارنده (عدد ششم در کارت شماره‌ی سه و ضرایب افت فشار ناشی از هر صفحه و نوع آن در کارت یازده) در این مدل‌سازی در نظر گرفته شده است.

۵-۲ ارزیابی صحت نتایج کد اصلاح شده

برای ارزیابی صحت نتایج مدل سازی با استفاده از کد اصلاح شده، شرایط حالت پایا و حادثه‌ی از کار افتادن چهار پمپ مدار اول در نیروگاه اتمی بوشهر با این کد بررسی شد. نتایج این مدل سازی با نتایج گزارش تحلیل ایمنی نهایی نیروگاه اتمی بوشهر مقایسه شدند. نتایج حاصل از کد اصلاح شده تطابق خوبی را نشان دادند. نتایج حالت پایا در جدول ۵-۱ آورده شده است.

جدول ۵-۱. نتایج حالت پایا.

پارامتر	COBRA-EN	واقعی
دمای خروجی محفظه تحت فشار (°C)	۳۲۲	۳۲۱
حداکثر دمای مرکز سوخت (°C)	۱۷۴۶	۱۸۸۳
فشار خروجی رآکتور (MPa)	۱۵٫۶	۱۵٫۷
حداکثر دمای سطح بیرونی غلاف (°C)	۳۴۷	۳۵۲
حداقل مقدار DNBR	۱٫۶۹	۱٫۷۵

پس از بررسی نتایج حالت پایا و تأیید صحت آن در ادامه به نتایج حالت گذرا پرداخته شده است. برای این منظور، در ورودی کد COBRA-EN اصلاح شده باید پارامترهایی در زمان‌های مختلف (از جمله توان، دما، فشار و دبی) برای حادثه‌ی تریپ چهار پمپ مدار اول که در گزارش تحلیل ایمنی نهایی موجود است به عنوان شرایط مرزی^۱ و شرایط اولیه^۲ با کارت‌های مختلف وارد شود. در نتیجه‌ی خاموشی چهار پمپ مدار اول و رویدادهایی که به دنبال این حادثه پشت سر هم اتفاق می‌افتند (جدول ۵-۲)، توان، دبی، دمای سیال ورودی به قلب و فشار دچار تغییراتی می‌شوند که نمودار این پارامترها بر حسب زمان به عنوان شرایط مرزی به کد داده می‌شود. این نمودارها در فصل پانزده گزارش تحلیل ایمنی نهایی بوشهر ارائه شده‌اند.

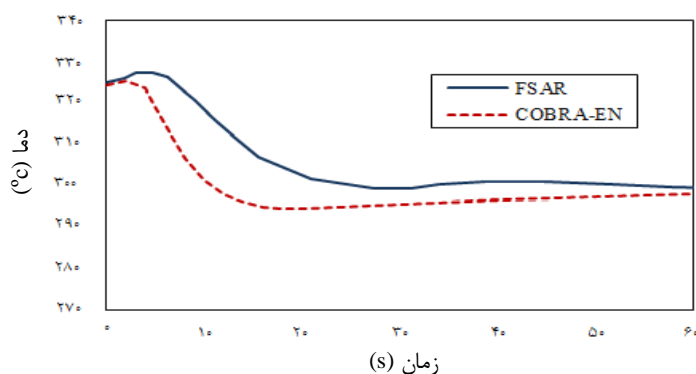
شکل ۵-۸ نشان‌دهنده‌ی دمای سیال خنک‌کننده‌ی خروجی از قلب رآکتور است. دمای خروجی تغییر چندانی طی حادثه نمی‌کند. دمای خروجی قلب در ثانیه‌های اولیه به علت افت توان و افت دمای سوخت افت می‌کند. سپس با بالا رفتن فشار مدار اولیه، افزایش می‌یابد که این افزایش چندان زیاد نیست. نتایج کد با نتایج FSAR در تطابق خوبی با هم قرار دارند.

از جمله پارامترهای مهم ترموهیدرولیکی بیشینه دمای مرکز سوخت و بیشینه دمای سطح غلاف است. شکل ۵-۹ تغییرات بیشینه دمای مرکز سوخت را برای گرم‌ترین میله‌ی سوخت بر

1. Boundary condition

2. Initial condition

حسب زمان نشان می‌دهد. بیشینه دمای مرکز سوخت برای رآکتور بوشهر 1883°C است. در این حادثه به علت صدور سیگنال خاموشی و ورود سریع میله‌های کنترل، توان کاهش یافته و به تبع آن دمای مرکز سوخت کاهش می‌یابد. همان‌طور که از شکل ۵-۹ مشخص است نتایج تطابق خوبی با هم دارند.

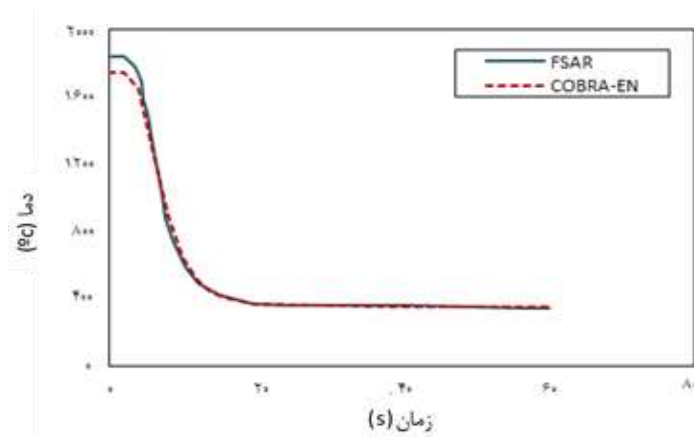


شکل ۵-۸. دمای خروجی خنک‌کننده از قلب.

جدول ۵-۲. رویدادهای پس از وقوع حادثه‌ی خاموشی چهار پمپ.

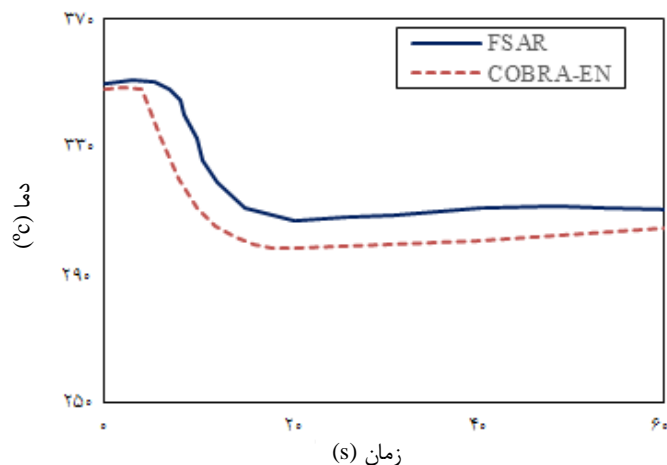
رویداد	زمان (s)
خاموشی هر ۴ پمپ اصلی، سیگنال خاموشی	۰
شروع حرکت میله‌های کنترل	۱٫۹
تزریق خنک‌کننده به فشارنده	۳٫۴-۷٫۲
بسته شدن شیر قطع‌کننده‌ی توربین ژنراتور	۶٫۹-۷٫۵
به‌کار افتادن BRU-A در مولدهای بخار ۱، ۳ و ۴ (به‌کار نیفتادن BRU-A در مولد بخار ۲)	۱۳٫۸
از دست رفتن آب تغذیه‌ی اصلی به مولدهای بخار ۱-۴	۱۶٫۰-۱۷٫۰
فشار بیشینه در مدار ثانویه برابر 7.72 MPa	۲۲٫۰
عملکرد تناوبی شیرهای BRU-A در مولدهای بخار ۱، ۲، ۳ و ۴ که بر اساس برنامه‌ی فشار کار می‌کنند و بیش‌ترین فشار در هد اصلی بخار ^۱ را برابر 6.67 MPa نگه می‌دارند.	۵۵٫۰-۷۲۰۰٫۰

1. Main steam header



شکل ۵-۹. بیشینه دمای مرکز سوخت.

شکل ۵-۱۰ دمای سطح غلاف سوخت را نشان می‌دهد. طبق معیارهای مورد پذیرش بیشترین دمای غلاف برای گرم‌ترین میله‌ی سوخت طی وضعیت اضطراری نباید از 1200°C تجاوز کند. همان‌طور که از شکل مشخص است بیشینه دمای سطح غلاف از این مقدار فراتر نمی‌رود و مقادیر به‌دست آمده از کد در تطابق خوبی با مقادیر گزارش تحلیل نهایی ایمنی هستند.



شکل ۵-۱۰. بیشینه‌ی دمای سطح غلاف سوخت.

فایل ورودی کد در این مثال در سی‌دی همراه کتاب در قالب فایل پی‌دی‌اف با نام پیوست دو آمده است.

۳-۵ خلاصه و جمع‌بندی مطالب فصل

همان‌طور که ذکر شد با اعمال اصلاحاتی در کد COBRA-EN استفاده از این کد برای رآکتورهای VVER1000 با دقت خوبی میسر است. هدف از این اصلاحات کاهش خطای مدل‌سازی با کد COBRA-EN در رآکتورهای VVER1000 است. این اصلاحات شامل در نظر گرفتن حفره‌ی مرکزی سوخت و تعداد صفحات مشبک در رآکتور VVER1000 نسبت به رآکتورهای غربی است. همچنین، با اعمال تغییراتی در کد، قابلیت مدل‌سازی غلاف آلومینیومی نیز به کد اضافه شد.

۴-۵ مراجع

۱. پایان‌نامه کارشناسی ارشد با عنوان بررسی شار حرارت بحرانی (CHF) در رآکتورهای PWR، امین عباسی سرچشمه، (۱۳۹۵).
۲. پایان‌نامه کارشناسی ارشد با عنوان محاسبات ترموهیدرولیکی قلب رآکتور هسته‌ای بوشهر (VVER-1000) با استفاده از کوپل کدهای COBRA-EN، WIMS و CITATION، امیرحسین صفاری نوش‌آبادی، (۱۳۸۷).
۳. پایان‌نامه کارشناسی ارشد با عنوان بررسی اثر ورود اشیا فلزی در مدار اول نیروگاه اتمی بوشهر با استفاده از کدهای RELAP5/MOD3.2 و COBRA-EN، رحمان قراری، (۱۳۹۴).
4. FSAR (Final Safety Analysis Report), BNPP, chapters 4, 15, Atomic Energy Organization of Iran NPP Bushehr Unit 1, (2003).

واژه‌نامه

یکا	توضیحات	نماد
ft ²	سطح عبوری جریان محوری	A
lbm/ft ³	چگالی سیال دو فاز	ρ
lbm/ft ³	چگالی مخلوط در انتهای بازه‌ی زمانی قبلی (یا در شروع بازه‌ی زمانی فعلی)	ρ^n
lbm/hr	دبی جرمی محوری سیال دو فاز	m
lbm/hr	دبی جریان عرضی سیال دو فاز	W
lbm/ft ³	چگالی مایع (برای مایع اشباع $\rho_l = \rho_f$)	ρ_l
lbm/ft ³	چگالی بخار	ρ_v
-	کسر حجمی بخار	α
BTU/lbm	آنتالپی سیال دو فاز	h
BTU/lbm	آنتالپی در پایان بازه‌ی زمانی قبلی	h^n
BTU/lbm	آنتالپی مایع	h_l
BTU/lbm	آنتالپی بخار	h_v
-	کیفیت	x
BTU/s.ft ²	مقدار شار حرارتی ناشی از میله‌ی سوخت که به سیال منتقل می‌شود	q''
BTU/s.ft	توان خطی تولیدی در میله‌ی سوخت	q'
lbm/s	مقدار جریان عرضی متلاطم	w'
K	درجه‌ی حرارت	T
-	شاخص کانال مجاور کانال i	n
-	میانگین حسابی ضریب هدایت حرارتی	\bar{K}
-	فاکتور هندسی برای هدایت حرارت بین دو کانال مجاور	G_T
-	کسر انرژی تولیدی از شکافت که مستقیماً در سیال جذب می‌شود.	r_Q
ft/s ²	شتاب جاذبه	g
psi	فشار	P
Deg	زاویه‌ی کانال نسبت به محور عمودی	θ
-	ضریب اصطکاک	f
-	ضریب افزایش دهنده‌ی اصطکاک دو فاز	ϕ^r
-	ضریب افت فشار شبکه‌ی نگه‌دارنده	K
-	ضریب اصطکاک تکانه‌ی عرضی	f_T
lbm/s	دبی جرمی جریان محوری مخلوط	\dot{m}
lbm/s	دبی جرمی جریان عرضی	w_k
-	کسر بخار	α_v

ft/s	سرعت محوری بخار	U_v
ft	پهنای شکاف عرضی	s_k
ft/s	سرعت عرضی بخار	V_v
lbm/ft ² s	میزان تولید بخار	Γ'_v
s	بازه‌ی زمانی	Δt
ft	طول بازه‌ی محوری z	Δx_z
-	نسبت لغزش	s
ppm	غلظت بور	c
ft ³ /lbm	حجم ویژه	v'
lbm/s	دبی	G
ft	قطر هیدرولیکی	D_h
Pa.s	ویسکوزیته‌ی دینامیکی سیال	μ_{bulk}
ft	محیط گرم‌شده	P_h
ft	محیط خیس‌شده	P_w
-	فاکتور اصطکاکی	f_{iso}
Pa.s	ویسکوزیته‌ی دینامیکی سیال در دمای دیواره	μ_{wall}
-	ضریب اتلاف	K_G
Pa.s	ویسکوزیته‌ی دینامیک مایع اشباع	μ_l
Pa.s	ویسکوزیته‌ی دینامیک بخار اشباع	μ_g
-	کیفیت تعادلی	x_e
BTU/ft.K	گرمای ویژه‌ی مایع اشباع	C_{pf}
lbf/ft	کشش سطحی	σ
BTU/ft.K.S	ضریب هدایت حرارتی مایع اشباع	K_f
ft ³ /lbm	حجم ویژه‌ی مایع اشباع	\mathcal{V}
lbf/ft ²	تنش برشی دیواره	τ_w
BTU/s.ft	توان تولیدی در سوخت بر واحد طول	Q'_F
ft ³	حجم سوخت بر واحد طول	V_F
ft	شعاع قرص سوخت	R_F
BTU/ft ² K	ضرب انتقال حرارت فضای گازی	H_{gap}
Btu/lbm.F	ضریب انتقال حرارت بین میله‌ی سوخت و سیال خنک‌کننده	H
K	درجه حرارت توده‌ی سیال خنک‌کننده	T_b
K	درجه حرارت گره‌ی واقع در سطح میله‌ی سوخت شماره‌ی n	T_n
Btu/lbm.F	ضریب انتقال حرارت بین میله‌ی n و سیال کانال l	H_{nl}
K	درجه حرارت توده‌ی سیال کانال l	T_{bl}

-	کسر توانی از میله‌ی n که به کانال l وارد می‌شود	Φ_{nl}
K	دمای دیواره‌ی میله‌ی سوخت	T_w
K	دمای اشباع سیال	T_{sat}
K	دمای محلی سطح میله‌ی سوخت	T_s
-	فاکتور عدد رینولدز	F
-	فاکتور شار حرارتی محوری غیریکنواخت	Y
BTU/lbm	انتالپی زیر اشباع	Δh_{in}
ft	فاصله‌ی محوری از شروع طول گرم	Z
BTU/s.ft ²	شار حرارتی شعاعی متوسط در مکان محوری z	$\bar{q}''(z)$
BTU/lbm	گرمای نهان تبخیر	h_{fg}