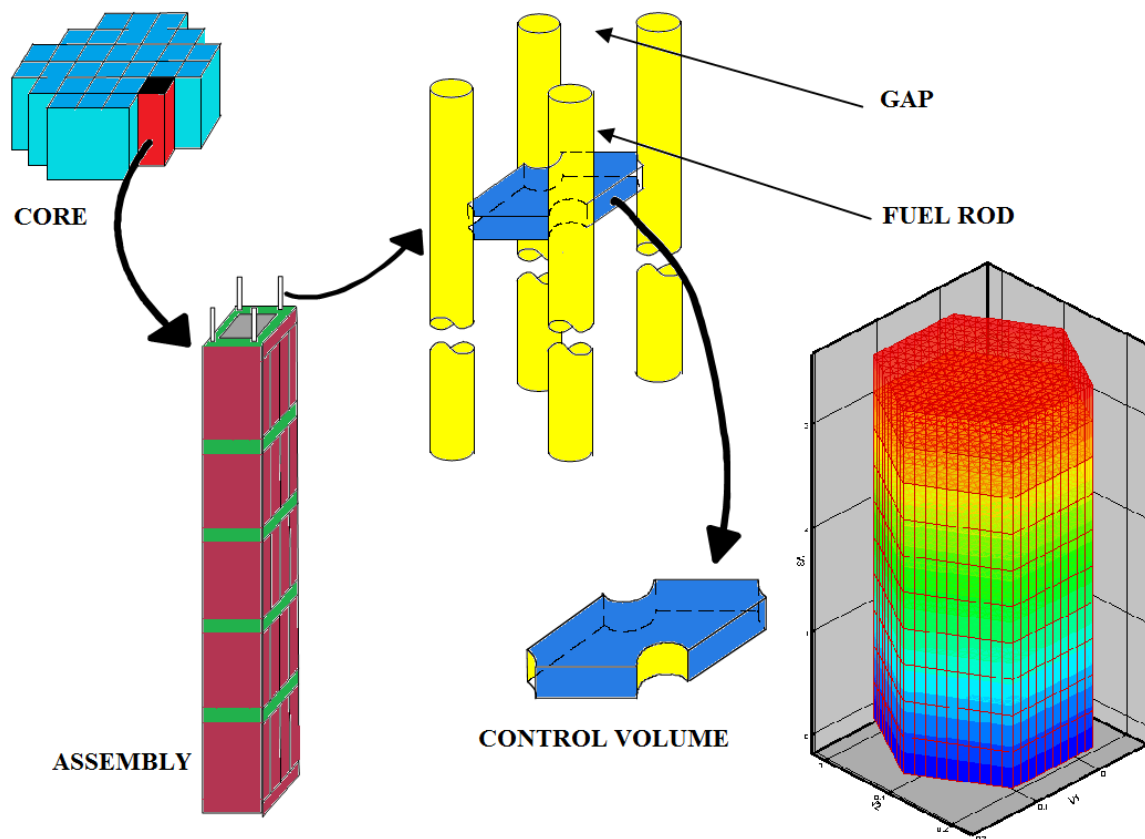


گزارش فنی کد تحلیل ترموهیدرولیکی آرایه‌ای از میله‌های سوخت با استفاده از روش زیرکانال در حالت پایا (ARAS 1.0) THERMAL-HYDRAULIC ANALYSIS OF THE FUEL ROD ARRAYS USING SUBCHANNEL APPROACH IN STEADY-STATE



گزارش فنی کد ARAS1.0

ویرایش ۰ - آذر ۱۳۹۶

فهرست مطالب

۱- چکیده	۸
۲- کلیدواژه	۸
۳- اختصارات	۹
۴- مقدمه	۹
۵- دامنه گزارش	۱۲
۶- مدل‌سازی جریان سیال	۱۳
۶-۱- معادلات بقای سیال	۱۴
۶-۲- روابط کمکی و تجربی	۱۹
۶-۲-۱- روابط محاسبه افت فشار اصطکاکی تک فاز	۲۰
۶-۲-۲- ضریب افت فشار اصطکاکی دوفازی	۲۰
۶-۲-۳- مدل جوشش مادون سرد	۲۱
۶-۲-۴- مدل روابط کسر خلأ و کیفیت بخار	۲۳
۶-۲-۵- دبی جرمی جریان عرضی متلاطم	۲۴
۷- مدل‌سازی انتقال حرارت در میله سوخت	۲۵
۷-۱- مدل انتقال حرارت رسانش سوخت	۲۵
۷-۲- مدل انتقال حرارت سطح غلاف و سیال	۲۶
۷-۳- مدل انتقال حرارت گپ سوخت و غلاف	۲۸
۷-۴- مدل‌سازی شار حرارتی بحرانی	۳۲
۸- شبکه‌بندی و گسسته‌سازی معادلات	۳۳

- ۸-۱- شبکه‌بندی و گسسته‌سازی معادلات سیال ۳۴
- ۸-۲- شبکه‌بندی و گسسته‌سازی معادلات سوخت ۳۸
- ۹- شرایط مرزی ۴۰
- ۱۰- توصیف الگوریتم محاسباتی ۴۱
- ۱۱- نتایج ۴۵
- ۱۱-۱- مسئله شماره ۱ ۴۶
- ۱۱-۲- مسئله شماره ۲ ۵۷
- ۱۱-۳- مسئله شماره ۳ ۶۷
- ۱۲- نتیجه‌گیری ۷۷
- ۱۳- مراجع ۷۸

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱: نمایی از حجم بندی سیال در مرکز ۱۱
- شکل ۲: نمایی از حجم بندی میله در مرکز ۱۱
- شکل ۳: نمونه مش بندی کانال‌های سیال در روش زیرکانال با رویکرد سیال در مرکز ۳۴
- شکل ۴: حجم کنترل در نظر گرفته شده برای معادلات بقا ۳۵
- شکل ۵: حجم کنترل در نظر گرفته شده برای معادلات بقا (نمای جانبی) ۳۵
- شکل ۶: حجم بندی میله سوخت در راستای شعاعی (مدل اول) ۳۹
- شکل ۷: حجم بندی میله سوخت در راستای شعاعی (مدل دوم) ۳۹
- شکل ۸: روند نمای حل معادلات سیال و سوخت در کد ARAS1.0 ۴۵
- شکل ۹: آرایش میله‌ها و کانال‌ها در مسئله شماره ۱ ۴۶
- شکل ۱۰: توزیع محوری شار حرارتی در میله‌های داغ و با توان متوسط ۴۷
- شکل ۱۱: توزیع محوری فشار برای کانال شماره ۱ (کانال داغ) ۴۸
- شکل ۱۲: توزیع محوری دمای سیال برای کانال شماره ۱ (کانال داغ) ۴۸
- شکل ۱۳: توزیع محوری آنتالپی سیال برای کانال شماره ۱ (کانال داغ) ۴۹
- شکل ۱۴: توزیع محوری چگالی سیال برای کانال شماره ۱ (کانال داغ) ۴۹
- شکل ۱۵: توزیع محوری کسر خلأ برای کانال شماره ۱ (کانال داغ) ۵۰
- شکل ۱۶: توزیع محوری کیفیت غیر تعادلی بخار برای کانال شماره ۱ (کانال داغ) ۵۰
- شکل ۱۷: توزیع محوری شار حرارتی بحرانی برای کانال شماره ۱ (کانال داغ) ۵۱
- شکل ۱۸: توزیع محوری DNBR برای میله داغ ۵۱
- شکل ۱۹: فشار سیال در ورودی کانال‌ها ۵۲
- شکل ۲۰: آنتالپی سیال در خروجی کانال‌ها ۵۲
- شکل ۲۱: چگالی سیال در خروجی کانال‌ها ۵۳
- شکل ۲۲: کسر خلأ در خروجی کانال‌ها ۵۳
- شکل ۲۳: دبی جریان محوری در خروجی کانال‌ها ۵۴
- شکل ۲۴: توزیع جریان عرضی میان کانال‌های مجاور ۵۵
- شکل ۲۵: توزیع شعاعی بیشینه دمای سوخت برای میله داغ ۵۶

- شکل ۲۶: توزیع شعاعی بیشینه دمای سوخت برای میله با توان متوسط ۵۶
- شکل ۲۷: آرایش ۲۵ میله سوخت در آرایش چهار وجهی ۵۸
- شکل ۲۸: توزیع محوری شار حرارتی در میله‌های داغ و میله با توان متوسط ۵۸
- شکل ۲۹: توزیع محوری فشار برای کانال شماره ۲ (کانال داغ) ۵۹
- شکل ۳۰: توزیع محوری دمای سیال برای کانال شماره ۲ (کانال داغ) ۵۹
- شکل ۳۱: توزیع محوری آنتالپی سیال برای کانال شماره ۲ (کانال داغ) ۶۰
- شکل ۳۲: توزیع محوری چگالی سیال برای کانال شماره ۲ (کانال داغ) ۶۰
- شکل ۳۳: توزیع محوری کسر خلأ برای کانال شماره ۲ (کانال داغ) ۶۱
- شکل ۳۴: توزیع محوری کیفیت غیر تعادلی بخار برای کانال شماره ۲ (کانال داغ) ۶۱
- شکل ۳۵: توزیع محوری شار حرارتی بحرانی برای کانال شماره ۲ (کانال داغ) ۶۲
- شکل ۳۶: توزیع محوری DNBR برای میله داغ ۶۲
- شکل ۳۷: فشار در ورودی کانال‌ها ۶۳
- شکل ۳۸: چگالی سیال در خروجی کانال‌ها ۶۳
- شکل ۳۹: کسر خلأ در خروجی کانال‌ها ۶۴
- شکل ۴۰: آنتالپی سیال در خروجی کانال‌ها ۶۴
- شکل ۴۱: دبی جریان محوری در خروجی کانال‌ها ۶۵
- شکل ۴۲: توزیع دبی جریان عرضی میان کانال شماره ۲ و کانال‌های همسایه آن ۶۶
- شکل ۴۳: توزیع شعاعی بیشینه دمای سوخت برای میله داغ ۶۶
- شکل ۴۴: توزیع شعاعی بیشینه دمای سوخت برای میله با توان متوسط ۶۷
- شکل ۴۵: آرایش ۳۳۱ میله سوخت مثلثی ۶۹
- شکل ۴۶: توزیع محوری شار حرارتی برای میله‌های داغ و میله با توان متوسط ۶۹
- شکل ۴۷: توزیع محوری فشار برای کانال شماره ۵۰ (کانال داغ) ۷۰
- شکل ۴۸: توزیع محوری دمای سیال برای کانال شماره ۵۰ (کانال داغ) ۷۰
- شکل ۴۹: توزیع محوری آنتالپی سیال برای کانال شماره ۵۰ (کانال داغ) ۷۱
- شکل ۵۰: توزیع محوری چگالی سیال برای کانال شماره ۵۰ (کانال داغ) ۷۱
- شکل ۵۱: توزیع محوری کسر خلأ برای کانال شماره ۵۰ (کانال داغ) ۷۲

- شکل ۵۲: توزیع محوری کیفیت غیر تعادلی بخار برای کانال شماره ۵۰ (کانال داغ)..... ۷۲
- شکل ۵۳: توزیع محوری شار حرارتی بحرانی برای کانال شماره ۵۰ (کانال داغ)..... ۷۳
- شکل ۵۴: توزیع محوری DNBR برای میله داغ..... ۷۳
- شکل ۵۵: توزیع فشار در ورودی کانال‌ها..... ۷۴
- شکل ۵۶: توزیع دبی جریان محوری در خروجی کانال‌ها..... ۷۴
- شکل ۵۷: توزیع دبی جریان عرضی میان کانال شماره ۵۰ و کانال‌های همسایه آن..... ۷۵
- شکل ۵۸: توزیع شعاعی بیشینه دمای سوخت برای میله داغ..... ۷۶
- شکل ۵۹: توزیع شعاعی بیشینه دمای سوخت برای میله با توان متوسط..... ۷۶

فهرست جدول‌ها

- جدول شماره ۱: مقادیر ثابت‌های A و B برای گازها ۳۰
- جدول شماره ۲: مشخصات مسئله شماره ۱ ۴۷
- جدول شماره ۳: مشخصات مسئله شماره ۲ ۵۷
- جدول شماره ۴: مشخصات مسئله شماره ۳ ۶۸

۱- چکیده

با توجه به اهمیت مدل‌سازی دقیق قلب راکتورهای هسته‌ای به منظور پیش‌بینی حوادث احتمالی و اثرات آن، کد محاسباتی ARAS1.0 توسعه داده شده است. در این کد، تحلیل ترموهیدرولیکی آرایه‌ای از میله‌های سوخت در حالت پایا در چیدمان‌های مربعی و یا مثلثی و در شرایط سیال تک‌فازی و دوفازی با استفاده از روش زیرکانال صورت می‌گیرد. بدین ترتیب کلیه پارامترهای سیال خنک‌کننده که از میان میله‌های سوخت حرکت می‌کند، در حالت تک‌فاز و دوفاز با استفاده از مدل همگن و همچنین با امکان لحاظ نمودن نسبت لغزش مخالف یک به دست خواهد آمد. همچنین با توجه به استفاده از روش زیرکانال، جریان‌های عرضی میان کانال‌های عبور خنک‌کننده در نظر گرفته شده که این امر منجر به تخمین مناسبی از پارامترهای سیال در قلب می‌گردد. علاوه بر این، در میله‌های سوخت، توزیع دمایی در هر فاصله طولی در کانال و فواصل شعاعی در هر میله با استفاده از معادله رسانش حرارتی برای دو نوع سوخت توپر و توخالی (دارای حفره مرکزی) و با لحاظ ضریب انتقال حرارت فاصله‌گازی (گپ) به صورت ثابت یا متغیر (بر حسب کسر مولی گازها) به دست می‌آید. همچنین در کد ARAS1.0 به منظور نزدیک نمودن تحلیل سیستم‌ها به حالت واقعی، امکان مدل‌سازی نگهدارنده‌های سوخت (مهارکننده‌ها) با تعداد دلخواه تا حداکثر ۲۰ عدد، در نظر گرفته شده است. به منظور بررسی کد توسعه داده شده نتایج حاصل با نتایج حاصل از کد تجاری COBRA-EN مقایسه شده است.

لازم به ذکر است، کد ARAS1.0، به زبان برنامه‌نویسی فرترن^۱ ۹۰ نوشته شده است و تمامی مراحل توسعه کد، از جمله اجرای مسائل نمونه تحت سیستم عامل ۶۴-بیتی و بر روی رایانه‌ای با پردازنده intel و با CPU ۳/۴ گیگاهرتزی انجام شده است.

۲- کلیدواژه

کد ARAS1.0، روش زیرکانال، مدل همگن، جریان دوفاز، شرایط پایا، کد COBRA-EN

¹ Fortran90

۳- اختصارات

توضیح	عبارت اختصاری	عبارت
کد محاسباتی ترموهیدرولیکی حالت گذرای قلب و مجتمع سوخت راکتور هسته‌ای آب سبک	COBRA	Coolant Boiling in Rod Arrays
مدل تعادلی همگن	HEM	Homogenous Equilibrium Method
کد محاسباتی ترموهیدرولیکی آرایه‌ای از میله‌های سوخت در حالت پایا با استفاده از روش زیرکانال	ARAS1.0	Thermal-hydraulic Analysis of the Fuel Rod Arrays Using Subchannel Approach in Steady-state
نسبت انحراف از جوشش هسته‌ای	DNBR	Departure from Nucleate Boiling Ratio

۴- مقدمه

مدل‌سازی قلب راکتورهای هسته‌ای و بررسی ترموهیدرولیکی آن از مهم‌ترین مسائل در طراحی یک راکتور هسته‌ای به شمار می‌رود. از این رو، شبیه‌سازی و مدل‌سازی دقیق رفتار سیال و سوخت در قلب راکتور، از دیرباز مورد توجه بسیاری از محققین صنعت هسته‌ای در سراسر جهان بوده است. بر این اساس، حتی با وجود کدهای محاسباتی تجاری معتبر در این زمینه، هنوز بخش اعظمی از تحقیقات در زمینه محاسبات ترموهیدرولیکی یک راکتور هسته‌ای به این حوزه اختصاص دارد. در زمینه تحلیل زیرکانال کدهای تجاری متنوعی توسعه یافته است که از مهم‌ترین آنها می‌توان به کد COBRA اشاره نمود. این کد که برای بررسی قلب و مجتمع‌های سوخت راکتورهای آب سبک با رویکرد زیرکانال توسعه یافته است، در نسخه‌های متنوعی از جمله COBRAIII, COBRAIV, COBRA-EN عرضه شده است، به گونه‌ای که در هر نسخه سعی شده است تا کاستی‌های نسخه قبل به حداقل برسد [۲۱]. نسخه‌ای که در کد ARAS1.0 برای مقایسه استفاده شده است، نسخه COBRA-EN است.

در حالت کلی، قلب هر راکتور هسته‌ای از مجموعه‌ای از میله‌های سوخت تشکیل شده است که با آرایش منظمی در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. برای محاسبات ترموهیدرولیکی قلب راکتور هسته‌ای در بیشتر موارد از دو رویکرد زیرکانال^۱ و محیط متخلخل^۲ استفاده می‌شود.

در روش محیط متخلخل، محدوده مورد نظر به تعدادی حجم و نواحی توده‌ای^۳ غوطه ور در آن تقسیم می‌شود. این روش، که برای بررسی نواحی تشکیل شده از یک محیط سیال پیوسته که تعدادی حجم جامد در آن قرار گرفته است به کار می‌رود، از عمومیت بالایی برخوردار است. به عنوان مثال، در حوزه صنعت هسته‌ای برای تحلیل مولد بخار در راکتورهای آب سبک تحت فشار یا تحلیل قلب راکتور می‌توان از این روش استفاده نمود. در روش محیط متخلخل از مفهومی با عنوان تخلخل برای تخمین جریان سیال در حجم‌های تعریف شده استفاده شده و بدین ترتیب بدون محدودیت در جهت حرکت سیال می‌توان جریان طولی و عرضی میان حجم‌های مختلف را به دست آورد.

در حقیقت در مورد این مدل، پارامترها به صورت میانگین حجمی تعریف می‌گردند. همچنین در این روش، معادلات برای تحلیل سیال و به دست آوردن توزیع دما، فشار و سرعت آن به دست می‌آید. با استفاده از این مدل می‌توان هندسه‌های مختلف و پیچیده‌تری را نسبت به مدل زیرکانال تحلیل نمود. در مدل محیط متخلخل معادلات بقا برای سیال با استفاده از تقسیم سیستم به حجم کنترل‌های کوچک، انتگرال‌گیری و خطی‌سازی معادلات روی فضای مورد نظر، به معادلات جبری تبدیل می‌شوند که با استفاده از روش‌های عددی قابل حل می‌باشد [۳].

برخلاف روش محیط متخلخل، در روش زیرکانال که زیر مجموعه این روش محسوب می‌شود، معادلات برای سوخت و سیال به صورت جداگانه و همزمان حل می‌گردد. مهم‌ترین ویژگی مدل زیرکانال نسبت به مدل ساده‌تر کانال‌های مجزا، در نظر گرفتن تبادل جریان میان کانال‌ها است. در مدل‌سازی جریان عرضی فرض می‌شود که سیال با انتقال میان کانال‌ها از طریق مرز بین آنها جهت حرکت خود را از دست می‌دهد و به عبارت دیگر در این فرض نیاز به تعریف دستگاه مختصات ثابت جداگانه برای مرزهای میان کانال‌ها نیست. در این حالت لازم است حجم‌های کنترلی متشکل از میله سوخت و سیال احاطه کننده آن در نظر گرفته شده و معادلات برای این حجم‌ها توسعه داده شود. برای این حجم‌بندی دو روش متداول وجود دارد:

¹ Sub-channel approach

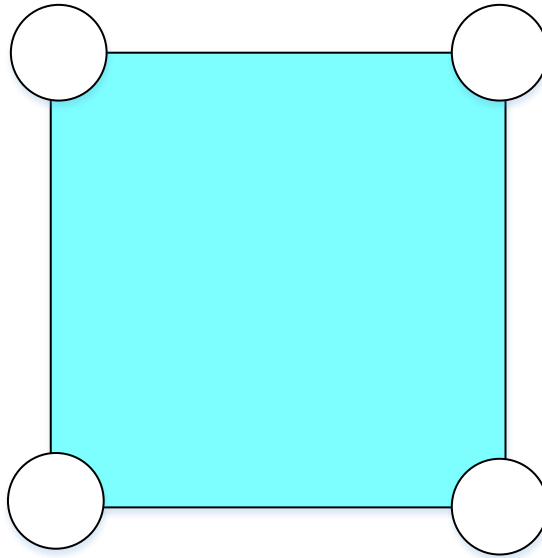
² Porous media approach

³ Lumped

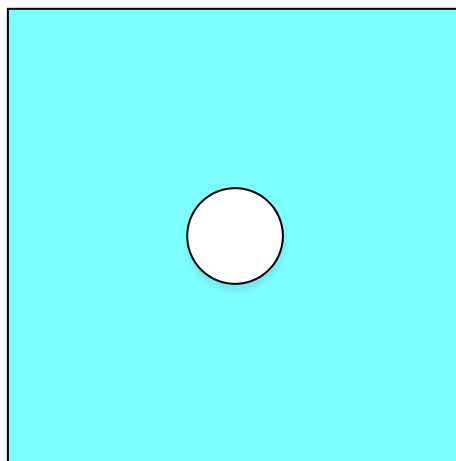
(۱) دیدگاه سیال در مرکز: حالتی که سیال در مرکز و میله سوخت در اطراف آن قرار گیرد.

(۲) دیدگاه میله در مرکز: حالتی که سوخت در وسط و سیال در اطراف آن در جریان باشد.

در شکل ۱ و شکل ۲ انواع حجم کنترل در این مدل نشان داده شده است که با توجه به پیچیدگی تعریف مرز کانال‌ها و ارتباط میان آنها در کد از مدل سیال در مرکز که دارای عمومیت بیشتری است، استفاده شده است. در نهایت با تعریف کانال‌های عبور سیال معادلات برای هر حجم گسسته‌سازی شده و با روند عددی مناسب حل می‌شود.



شکل ۱: نمایی از حجم بندی سیال در مرکز



شکل ۲: نمایی از حجم بندی میله در مرکز

همچنین برای بررسی جریان دوفازی سیال، به طور عمده از سه مدل تعادلی همگن^۱، شار رانشی^۲ و دو سیاله^۳ استفاده می‌شود که کارایی هر یک از این مدل‌ها بر اساس محدوده تغییرات پارامترهای سیال تعیین می‌شود. بدین ترتیب می‌توان بیان کرد که با تغییر از مدل همگن به مدل دو سیاله، به دقت و پیچیدگی محاسبات دوفازی افزوده می‌شود. در مدل تعادلی همگن، جریان دو فاز به عنوان یک جریان تک فاز با خواص میانگین سیال در نظر گرفته می‌شود. فرضیات اساسی در این مدل شامل برابری سرعت فاز مایع و بخار و برقراری تعادل ترمودینامیکی میان دو فاز است. هر چند با مخالف صفر در نظر گرفتن اختلاف سرعت فازهای مختلف توسط پارامتری مانند نسبت لغزش می‌توان تا حدی این فرض را تعدیل نمود و به تحلیل واقعی‌تری دست یافت. البته در بسیاری از موارد از جمله تحلیل قلب راکتورهای آب سبک تحت فشار در حالت پایا و یا برخی از حالت‌های گذرای با شدت کم نتایج به دست آمده از مدل تعادلی همگن به اندازه کافی قابل وثوق و استناد می‌باشد. در دو مدل دیگر بررسی جریان دوفازی، تعداد معادلات بقای مورد نیاز برای تحلیل سیستم بیشتر بوده و بدین ترتیب با توجه به غیر خطی بودن این معادلات و پیچیدگی‌های حل آنها، مشکلات زیادی به وجود خواهد آمد. در کد ARAS1.0، مدل دوفازی به کار رفته مدل تعادلی همگن می‌باشد که در کنار آن کد قابلیت لحاظ ضریب لغزش مخالف یک را نیز دارد.

جهت انجام محاسبات سوخت نیز از معادله رسانش حرارتی استفاده شده که با توجه به ارتباط میان سوخت و سیال از طریق غلاف، روند مناسبی برای تعیین ضریب انتقال حرارت جابجایی از سطح غلاف به سیال در نظر گرفته شده است که در این زمینه کد توسعه یافته می‌تواند رژیم‌های مختلف جریان دوفازی را در نظر گرفته و ضریب انتقال حرارت را تعیین کند.

۵- دامنه گزارش

در این گزارش، به نحوه توسعه، مدل‌سازی و اعتبارسنجی کد ARAS1.0 جهت تحلیل ترموهیدرولیکی چیدمانی از میله‌های سوخت (مربعی و یا مثلثی) در حالت دوفازی و شرایط پایا با استفاده از روش زیرکانال پرداخته شده است. نتایج خروجی شامل توزیع محوری افت فشار، آنتالپی، چگالی، کیفیت و کسر خلأ، شار حرارتی بحرانی و غیره برای سیال و توزیع شعاعی و محوری دمایی سوخت خواهد بود.

¹ Homogenous model

² Drift-flux model

³ Two-fluid

۶- مدل‌سازی جریان سیال

بررسی ترموهیدرولیکی شامل تعیین پارامترها و رفتار سیستم در شرایط عملکرد مختلف می‌باشد. در این زمینه برای بررسی هیدرودینامیک مسئله، معادلات انتقال جرم، انرژی و مومنتوم در شکل مناسب استفاده می‌شوند. این معادلات از معادلات پایه‌ای ساخته می‌شوند و سپس بر اساس مشخصات مسئله مورد بررسی، ساده‌سازی می‌گردند. در ابتدا برای مشتق کردن معادلات مورد نظر از معادلات کلی، فرض می‌شود که محیط از یک پیوستار تشکیل شده است که در آن خواص هر جزء از سیال که شامل مولکول‌های زیادی است، با خواص متوسط توصیف می‌شود. در این حالت، خواص میدانی جریان مانند دما، فشار، چگالی و غیره در هر نقطه از حجم مورد نظر با استفاده از معادلات دیفرانسیل بقای جرم، انرژی و مومنتوم قابل محاسبه است. منظور از معادلات بقا این است که تغییرات کل یک پارامتر در یک حجم دلخواه را می‌توان بر اساس اثرات خالص آن پارامتر که از مرز حجم عبور می‌کند و چشمه، چاه و نیروهای درونی و بیرونی که به سیستم وارد می‌شوند توصیف نمود.

با مقدمه عنوان شده در اینجا، می‌توان به این نتیجه رسید که برای توصیف یک جریان لازم است میدان جریان به تعدادی حجم تقسیم و رفتار سیال در هر حجم بررسی گردد. بر این اساس در ادامه فرض می‌شود که معادلات برای یک حجم کنترل نوشته شود. از طرف دیگر با وجود اختلافات موجود در جملات معادلات مورد نظر، ماهیت این جملات برای تمام معادلات یکسان می‌باشد. در حالت کلی، معادلات بقا را می‌توان بر اساس روش مورد نظر برای حل آن به فرم انتگرالی و یا دیفرانسیلی نوشت. در مواردی که این معادلات به شکل انتگرالی نوشته شوند با به‌کارگیری تقریب عددی برای محاسبه انتگرال می‌توان پاسخ معادلات را به دست آورد. این روش، روند به کار رفته در کدهایی است که از روش حجم محدود^۱ بهره می‌گیرند. از طرف دیگر در کدهایی که از روش تفاضل محدود^۲ استفاده می‌کنند، معادلات بقا به صورت دیفرانسیلی نوشته شده و تقریب‌های عددی برای جملات شامل مشتق به کار می‌رود. بنابراین با توجه به استفاده از روش تفاضل محدود در کد ARAS1.0، شکل دیفرانسیلی معادلات در ادامه توضیح داده خواهد شد.

قبل از ارائه روابط، لازم است برخی از مهم‌ترین پارامترهای جریان سیال مانند چگالی و دما شرح داده شود. این دو پارامتر در معادلات به صورت تابعی از دو متغیر فشار و آنتالپی تعیین می‌گردند:

$$\rho = \rho(h, P) \quad (1-6)$$

¹Finite volume

²Finite difference

$$T = T(h, P) \quad (۲-۶)$$

که در آن P و h به ترتیب فشار و آنتالپی سیال هستند. از طرف دیگر ویسکوزیته، μ و ضریب هدایت حرارتی، k ، به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\mu = \mu(T, P) \quad (۳-۶)$$

$$k = k(T, P) \quad (۴-۶)$$

بنابراین با توجه به اینکه یکی از بخش‌های سیستم در نظر گرفته شده، سیال عبور کننده از میان میله‌های سوخت است، برای تحلیل ترموهیدرولیکی این جریان، پس از حجم‌بندی سیستم، معادلات اصلی بقا برای هر حجم کنترل نوشته و سپس حل می‌گردد. علاوه بر این به منظور تکمیل فرایند حل لازم است معادلات کمکی که عمدتاً به صورت روابط تجربی هستند، مورد استفاده قرار گیرند که در بخش‌هایی که در ادامه ارائه شده است، این معادلات به طور کامل شرح داده می‌شوند.

۶-۱- معادلات بقای سیال

همانگونه که اشاره شد برای محاسبه پارامترهای ترموهیدرولیکی سیال در کد ARAS1.0، از روش زیرکانال استفاده شده است. در این روش، مسیر عبور سیال از میان کانال‌هایی تعریف می‌گردد که با میله‌های سوخت در ارتباط هستند. این کانال‌ها به تعدادی حجم کنترل محوری تقسیم شده و پارامترهای سیال مانند دما و چگالی به صورت مقادیر متوسط در هر حجم تعیین می‌گردد. همچنین بر خلاف مدل کانال‌های مجزا، در این محاسبات، انتقال جرم، انرژی و مومنتوم از طریق ارتباط میان کانال‌های مجاور با یکدیگر بررسی می‌شود. بنابراین در این روش علاوه بر معادلات بقای سه گانه، معادله بقای مومنتوم جانبی نیز بایستی در نظر گرفته شود. با توجه به مدل دوفازی همگن در نظر گرفته شده برای محاسبات ترموهیدرولیکی سیال، معادلات بقای اصلی جرم، انرژی و مومنتوم محوری به همراه معادله بقای مومنتوم جانبی در مختصات یک بعدی و در حالت پایا به صورت زیر خواهد بود [۳]:

- معادله بقای جرم

$$\frac{\partial}{\partial z} \dot{m} + \sum_{k \in i} e_{ik} w = 0 \quad (5-6)$$

که در آن:

$$\dot{m} = \text{دبی جرمی محوری سیال دوفاز (kg/s)}$$

$$w = \text{دبی جرمی جریان عرضی سیال دوفاز به ازای واحد طول (kg/m.s)}$$

در معادله (۵-۶)، k شماره سطح مشترک دو کانال مجاور است که جریان عرضی از طریق آن، میان دو کانال مبادله می‌گردد. e_{ik} پارامتری برای تعیین جهت جریان‌های عرضی میان کانال‌های i و i' است که به صورت ذیل در نظر گرفته شده است:

$$e_{ik} = \begin{cases} 1, & i < i' \\ -1, & i > i' \end{cases} \quad (6-6)$$

در معادله بقای جرم، جملات اول و دوم به ترتیب نرخ خالص جریان جرم در جهت محوری و جریان ورودی و خروجی در جهت جانبی از طریق مرز میان دو کانال مجاور که به هم متصل هستند می‌باشد. بر اساس تعریف پارامترهای سیال برای دبی جرمی جریان در طول کانال‌ها و دبی جریان عبوری از مرز مشترک دو کانال مجاور یکدیگر می‌توان نوشت:

$$\dot{m} = \rho u A \quad (7-6)$$

$$w = \rho v s \quad (8-6)$$

ρ : چگالی سیال (kg/m^3)

A : سطح مقطع کانال در جهت محوری (m^2)

s : سطح مقطع جریان در جهت عرضی (m^2)

در این روابط، u و v به ترتیب سرعت در راستای طولی و عرضی کانال‌ها است. با توجه به تعریف پارامترهای مذکور برای مخلوط، بایستی چگالی مخلوط را بر حسب چگالی هر یک از فازها محاسبه نمود:

$$\rho_g \alpha + \rho_l (1 - \alpha) = \rho \quad (9-6)$$

ρ_l : چگالی مایع (kg/m^3)

ρ_g : چگالی بخار (kg/m^3)

α : کسر خلأ

در حالت کلی سه نوع دبی جریان در محاسبات زیرکانال وجود دارد. اولین دبی جریان که تحت عنوان دبی جرمی محوری شناخته می‌شود و با \dot{m} در این گزارش نمایش داده شده است، دبی جریان در جهت موازی با محور طولی کانال‌ها است. این دبی در جهت رو به بالا مثبت فرض می‌شود. دومین و سومین مقدار دبی جریان مربوط به دبی جریان‌هایی است که عمود بر محور طولی میان کانال‌ها انتقال پیدا می‌کنند. در حقیقت دو مکانیزم اصلی عامل تولید چنین جریانی خواهند بود:

- اختلاف فشار میان کانال‌های مختلف که به عنوان پتانسیلی برای انتقال جریان جانبی می‌شود.
- اختلاف در آشفتگی‌های ایجاد شده در جریان محوری هر کانال به علت ایجاد جریان ناآرام^۱

معمولاً، در مواردی که تغییرات شدید به عنوان مثال در هندسه و سطح مقطع عبور جریان وجود نداشته باشد، مقدار خالص دبی جریان عرضی در مقایسه با دبی جریان محوری ناچیز است. مواردی که منجر به اختلاف در افت فشار کانال‌ها می‌شود شامل، تغییر در سطح مقطع جریان، ایجاد جریان دوفازی در یک کانال و نگهدارنده‌های سوخت می‌باشد. در مقابل، عامل اصلی ایجاد جریان عرضی ناآرام در اثر حضور گردابه‌های جریان است. در کد ARAS1.0 همچون کد مشابه تجاری آن یعنی COBRA-EN، فرض می‌شود که گردابه‌های جریان منجر به تبادل جرم خالص میان کانال‌ها نگردد. به همین دلیل در معادله بقای جرم، دبی جریان عرضی متلاطم^۲ در نظر گرفته نشده است. با

¹Turbulent fluctuations

²Turbulent cross flowrate

این وجود این گردابه‌ها می‌توانند با خود مومنوم را منتقل نمایند. برای محاسبه مقدار این جریان که در این گزارش با w' نمایش داده می‌شود از روابط تجربی استفاده خواهد شد که در بخش‌های آتی این روابط توصیف می‌شوند [۲].

- معادله بقای انرژی

$$\frac{\partial}{\partial z} \dot{m}h + \sum_{k \in i} e_{ik} w h = \sum_{m \in i} \phi_{im} P_h q''_w + \sum_{m \in i} \phi_{im} r_q q' - \sum_{k \in i} w' (\Delta h) - \sum_{k \in i} C_k s_k (\Delta T) \quad (10-6)$$

در این رابطه:

h : آنتالپی سیال (kJ/kg)

q''_w : مقدار شار حرارتی میله سوخت که به سیال منتقل می‌شود (فرض می‌شود که مقدار آن در اطراف سوخت یکنواخت باشد) (W/m^2)

q' : توان خطی تولیدی در میله سوخت (W/m)

w' : جریان عرضی متلاطم ($kg/s.m$)

T : دمای سیال (K)

r_q : کسر انرژی تولیدی از شکافت که به طور مستقیم در سیال جذب می‌شود.

ϕ_{im} : کسر حرارت تولید شده از میله سوخت در کانال

P_h : محیط گرم‌شونده (m)

s : فاصله بین میله‌های سوخت (m)

C_k : هدایت حرارتی در جهت جانبی که به وسیله معادله ذیل بدست آورده می‌شود:

$$C_k = G_T \bar{k} / l \quad (11-6)$$

\bar{k} : متوسط حسابی ضریب هدایت حرارتی برای کانالهای 1 و l و ($W/m.k$)

G_T : ضریب هندسی برای ضریب هدایت حرارتی

همچنین آنتالپی مخلوط از طریق رابطه (۶-۱۲) به آنتالپی فازها مرتبط می‌شود:

$$\rho_g \alpha h_g + \rho_l (1 - \alpha) h_l = \rho h \quad (۶-۱۲)$$

در معادله بقای انرژی، جملات سمت چپ به ترتیب بیانگر انتقال آنتالپی در جهت محوری و جانبی بوده و در سمت راست حرارت تولید شده در کانال در اثر تماس با میله‌های سوخت در جملات اول و دوم و تبادل انرژی از طریق اختلاط در جهت محوری و رسانش حرارتی سیال در جملات سوم و چهارم گنجانده شده است.

- معادله بقای مومنتوم محوری

$$\frac{\partial}{\partial z} \frac{\dot{m}^2 v'}{A} + \sum_{k \in i} (e_{ik} w \frac{\dot{m} v'}{A} - f_t w' \Delta u) = -A \frac{\partial}{\partial z} P - \frac{1}{2} \left(\frac{f_w}{D_h} \frac{\Phi^2}{\rho_l} + k' v' \right) \frac{\dot{m}^2}{A} - g A \rho \cos \theta \quad (۶-۱۳)$$

که در آن :

g : شتاب جاذبه (m/s^2)

P : فشار (Pa)

θ : زاویه کانال نسبت به محور عمودی

f_w = ضریب اصطکاک در دیواره

f_t = ضریب اصطکاک مومنتوم عرضی

k : ضریب افت فشار برای نگهدارنده‌های سوخت

D_h : قطر هیدرولیکی کانال (m)

Φ^2 : ضریب تجمعی افت فشار اصطکاکی

v' : حجم مخصوص مؤثر برای انتقال مومنتوم بوده که به صورت ذیل تعریف می‌شود:

$$v' = \frac{x^2}{\alpha \rho_g} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)\rho_1} \quad (14-6)$$

در معادله بقای مومنتوم محوری جملات سمت چپ نشان‌دهنده تبادل مومنتوم در جهت محوری و جانبی و معادلات سمت راست بیانگر نیروهای موثر در هر حجم کنترل شامل نیروهای گرادیان فشار، اصطکاک و شتابی است. نهایتاً برای محاسبه جریان عرضی بین کانال‌ها از معادله بقای مومنتوم در جهت عرضی استفاده می‌شود.

- معادله بقای مومنتوم جانبی

$$\frac{\partial}{\partial z} (\bar{u}'w) = \frac{s}{1} \Delta z (P_{1+\Delta l} - P_1) - \frac{1}{2} \left(K_G \frac{s}{1} \right) \rho |v|v \quad (15-6)$$

در این رابطه، مقدار اختلاف فشار در دوطرف گپ (فاصله میان میله‌ها) در مقطع ورودی کانال‌ها در نظر گرفته می‌شود. همچنین در این معادله، \bar{u}' سرعت متوسط سیال در فاصله کانال است. بنابراین، جمله اول در سمت راست معادله بالا، اختلاف فشار جانبی روی سطوح (مرزهای) حجم کنترل مومنتوم می‌باشد در حالی که جمله‌ی بعد، افت فشار در جریان جانبی است. بدین ترتیب معادلات ارائه شده بایستی پس از مش‌بندی و تعیین کانال‌های عبور سیال با الگوریتم محاسباتی مناسب حل شده تا پارامترهای سیال حاصل شوند.

۶-۲- روابط کمکی و تجربی

همان‌گونه که اشاره شد، به منظور حل معادلات بقای اصلی برای تخمین پارامترهای سیال و برای محاسبه برخی از جملات ارائه شده در معادلات بقای اصلی، استفاده از روابط کمکی اجتناب‌ناپذیر است. در این قسمت روابط به کار رفته در کد توصیف شده است. لازم به ذکر است با وجود تعداد زیاد روابط تجربی در تخمین هر پارامتر در این گزارش تنها روابطی ارائه شده است که در کد ARAS1.0 به کار رفته است. انتخاب این روابط بر اساس گستره تغییرات پارامترهای مسئله بوده است.

۶-۲-۱- روابط محاسبه افت فشار اصطکاکی تک فاز

در سمت راست معادله بقای مومنتم، معادله (۶-۱۳)، جمله افت فشار اصطکاکی ظاهر می‌شود. در حالت کلی برای تخمین افت فشار اصطکاکی می‌توان نوشت [۴]:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)_{\text{friction}} = \frac{1}{A_z} \int_{P_z} \tau_w dP_z \quad (۶-۱۶)$$

که در آن، τ_w ، تنش متوسط در دیواره، P_z محیط ترشونده، P فشار و A مساحت در جهت محوری است. در سیستم‌های تک‌فازی افت فشار اصطکاکی از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)_{\text{friction}} = \frac{f_w}{2D} \rho \{v\}^2 \quad (۶-۱۷)$$

که در آن f_w ضریب اصطکاک جریان تک‌فازی، ρ دانسیته، v سرعت و D قطر است و برای تخمین آن بر اساس نوع جریان که آرام و یا متلاطم باشد از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$f_w = \begin{cases} 0.32 \frac{1}{\text{Re}^{0.25}} & \text{Re} < 2000 \\ 64 \frac{1}{\text{Re}} & \text{Re} > 2000 \end{cases} \quad (۶-۱۸)$$

۶-۲-۲- ضریب افت فشار اصطکاکی دوفازی

پارامتر ضریب اصطکاک در جمله افت فشار اصطکاکی در جریان دوفازی را می‌توان به وسیله ضریب مناسب محاسبه نمود. این ضریب در حقیقت نسبت افت فشار جریان تک‌فازی به افت فشار جریان دوفازی با در نظر گرفتن سیال به شکل مایع است. بر این اساس پارامتر Φ_{f0}^2 به عنوان ضریب تجمعی افت فشار جریان دوفازی بر حسب افت فشار جریان تک‌فازی به شکل زیر تعریف می‌گردد:

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{\text{fric}}^{\text{TP}} = \phi_{f_0}^2 \left(\frac{dP}{dz}\right)_{\text{fric}}^{f_0} \quad (19-6)$$

در این رابطه، $\left(\frac{dP}{dz}\right)_{\text{fric}}^{\text{TP}}$ افت فشار اصطکاکی جریان دوفازی، $\left(\frac{dP}{dz}\right)_{\text{fric}}^{f_0}$ افت فشار جریان تک‌فاز با در نظر گرفتن سیال به شکل مایع است. ضریب افت فشار اصطکاکی به پارامترهای مختلفی همچون هندسه سیستم، مشخصات جریان و نوع سیال وابسته است. برای محاسبه این ضریب بایستی از روابط تجربی استفاده نمود. در این زمینه روابط تجربی مختلفی پیشنهاد شده است. هر یک از این روابط گستره کاری مخصوص به خود را داشته که بر اساس آن محاسبات انجام می‌شود. در این زمینه می‌توان به مدل EPRI اشاره کرد که برای سیستم‌های آب-بخار توسعه یافته است. فرض اصلی در این رابطه، مرتبط کردن ضریب افت فشار به کیفیت بخار در هر مقدار فشار است. همچنین در این رابطه فرض می‌شود که تعادل ترمودینامیکی میان فازها برقرار بوده و رژیم جریان ناآرام باشد. بدین ترتیب رابطه پیشنهاد شده به شکل زیر خواهد بود [5]:

$$\Phi^2 = 12.83 \left[\frac{\rho_l}{\rho_g} - 1 \right] G^{-0.45} x^{0.824} + 1 \quad (20-6)$$

در این رابطه:

G: شار جرمی سیال ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$)

x: کیفیت غیر تعادلی بخار است.

۶-۲-۳- مدل جوشش مادون سرد

در جریان دوفازی که در آن فازها در حالت تعادل ترمودینامیکی قرار دارند، کیفیت، یعنی نسبت دبی جرمی بخار به دبی جرمی مخلوط که بر اساس آنتالپی از رابطه (۶-۲۱) بدست می‌آید:

$$x = \frac{h - h_f}{h_v - h_f} \quad (21-6)$$

در این رابطه، h آنتالپی مخلوط و h_f و h_v به ترتیب آنتالپی مایع و بخار در حالت اشباع است. با این وجود در جریان مادون سرد، جایی که هنوز دمای سیال کمتر از دمای اشباع است امکان تولید حباب در دیواره کانال وجود دارد. در این حالت نمی‌توان از رابطه بالا برای تخمین کیفیت استفاده نمود. رابطه تجربی که برای این منظور استفاده می‌شود، رابطه Levy است [۳]:

$$\begin{cases} x = x_e - x_d \exp\left(\frac{x_e}{x_d} - 1\right) & x_e \geq x_d \\ x = 0 & x_e < x_d \end{cases} \quad (۲۲-۶)$$

که در آن:

$$x_d = -\frac{C_{pr} \Delta T_d}{h_{fg}}$$

$$Y_B^+ = \frac{0.015 \left[\frac{\sigma D_h}{\nu_f} \right]^{1/2}}{\mu_f}$$

$$\Delta T_d = \frac{q'}{P_h H_f} - Q Pr Y_B^+ \quad 0 \leq Y_B^+ \leq 5$$

$$\Delta T_d = \frac{q'}{P_h H_f} - 5Q \left[Pr + \ln \left[1 + Pr \left(\frac{Y_B^+}{5} - 1 \right) \right] \right] \quad 5 < Y_B^+ < 30$$

$$\Delta T_d = \frac{q'}{P_h H_f} - 5Q \left[Pr + \ln(1 + Pr) + 0.5 \ln \left(\frac{Y_B^+}{30} \right) \right] \quad 30 \leq Y_B^+$$

$$Q = \frac{q'}{P_h C_{pr} (\rho_f \tau_w)^{1/2}}$$

$$\tau_w = 0.125 f \nu_f G^2$$

$$H_f = 0.023 Re_f^{0.8} Pr_f^{0.4} \frac{k_f}{D_h}$$

در روابط فوق:

x_e : کیفیت تعادلی بخار

C_p : ظرفیت حرارتی ویژه (kJ/kg.k)

σ : کشش سطحی (N/m)

v_f : حجم مخصوص مایع اشباع (m³/kg)

f : ضریب اصطکاک سیال

Pr : عدد پرنتل (همه خواص در دمای اشباع محاسبه می‌شوند).

۶-۲-۴- مدل روابط کسر خلأ و کیفیت بخار

با محاسبه کیفیت بخار در دو حالت همگن (نسبت لغزش برابر یک) و استفاده از نسبت سرعت‌های فازی مخالف یک، کسر خلأ از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha = \frac{xv_g}{S(1-x)v_f + xv_g} \quad (۶-۲۳)$$

بنابراین در صورتی که نسبت لغزش مخالف یک در نظر گرفته شود، مقدار پارامتر S از رابطه اسمیت^۱، (۶-۲۴)، به دست می‌آید:

$$S = 0.4 + 0.6 \left[\frac{0.4 + x \left(\frac{v_g}{v_f} - 0.4 \right)}{0.4 + 0.6x} \right] \quad (۶-۲۴)$$

^۱ Smith

۶-۲-۵- دبی جرمی جریان عرضی متلاطم

همانگونه که پیش‌تر اشاره شده، برای محاسبه جریان عرضی که در اثر حضور گردابه‌های جریان ناآرام در سیال ایجاد می‌گردد، به جای استفاده از معادلات بقا از روابط تجربی استفاده می‌شود. در کد ARAS1.0 روابط گوناگونی برای محاسبه این پارامتر استفاده شده است که این روابط عبارتند از [۳]:

$$w'_k = a s_k G_k \quad (۲۵-۶)$$

$$w'_k = a Re^b s_k G_k \quad (۲۶-۶)$$

$$w'_k = a s_k Re^b D_k G_k \quad (۲۷-۶)$$

$$w'_k = a \frac{s_k}{1} Re^b D_k G_k \quad (۲۸-۶)$$

در این روابط:

a: ضریب به کار رفته برای محاسبه ضریب اصطکاک که برای جریان ناآرام برابر ۰/۳۲ و در جریان آرام برابر ۶۴ است در حالیکه b برای این دو رژیم جریان به ترتیب برابر با ۰/۲۵ و ۱- می‌باشد.

Re: عدد رینولدز:

$$Re_k = \frac{G_k D_k}{\mu_k} \quad (۲۹-۶)$$

D_k : قطر هیدرولیکی که به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$D_k = \frac{4(A_1 + A_{1'})}{(P_1 + P_{1'})} \quad (۳۰-۶)$$

در این معادله:

P: محیط گرم شونده کانال‌های 1,1'

A: سطح مقطع کانال‌های 1,1'

s: عرض جانبی کانال

هر یک از این روابط می‌تواند پاسخ‌های به دست آمده برای یک سیستم را تحت تاثیر قرار دهد.

۷- مدل سازی انتقال حرارت در میله سوخت

حرارت در قلب راکتور در میله‌های سوخت تولید شده و سپس از طریق سیال خنک کننده به خارج از قلب منتقل می‌شود. از این رو بررسی نحوه انتقال حرارت میله‌های سوخت از اهمیت بالایی برخوردار است. این انتقال انرژی از طریق دو مکانیزم اصلی انتقال حرارت رسانش در سوخت و انتقال حرارت جابه‌جایی از سطح میله سوخت به خنک‌کننده اتفاق می‌افتد.

۷-۱- مدل انتقال حرارت رسانش سوخت

در اجزای جامد مانند میله‌های سوخت درون قلب راکتور، انتقال حرارت می‌تواند تولید و منتقل گردد. با توجه به اهمیت بررسی توزیع دمایی در میله سوخت و نحوه انتقال آن به سایر اجزا برای بررسی عملکرد حرارتی سیستم‌ها، رسانش حرارتی در حالت‌های مختلف بایستی بررسی گردد. بنابراین با نوشتن موازنه انرژی در حالت سه‌بعدی و کلی می‌توان معادله انتقال حرارت رسانش را در حالت پایا به صورت زیر نوشت:

$$\nabla \cdot (K \nabla T) + q''' = 0 \quad (1-7)$$

در معادله (۱-۷)، K ضریب رسانش حرارتی سوخت، q''' چشمه حجمی تولید حرارت و T دما است. در معادله مذکور گرادیان دما بر حسب مختصات مورد نظر نوشته خواهد شد. با توجه به اینکه این معادله برای سوخت در مختصات استوانه‌ای بررسی می‌شود می‌توان آن را در حالت تک‌بعدی به صورت رابطه (۲-۷) نوشت:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rK \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q''' = 0 \quad (2-7)$$

این معادله، یک معادله دیفرانسیل مرتبه دوم است که پس از گسسته‌سازی با یک روش عددی مناسب حل می‌گردد (این مبحث در بخش‌های بعدی توضیح داده می‌شود). توزیع توان تولیدی در جامد و نحوه تعیین خواص

آن بر حسب دما به ساختار ماده مورد نظر بستگی دارد. در کد ARAS1.0، خواص سوخت وابسته به دما در نظر گرفته می‌شود.

۷-۲- مدل انتقال حرارت سطح غلاف و سیال

با توجه به انتقال حرارت در سیالات به صورت جابه‌جایی، این مکانیزم انتقال حرارت از اهمیت بالایی برخوردار است. خنک‌کننده حرارت را از میله سوخت برداشته و آن را به مدار ثانویه انتقال می‌دهد. خنک‌کننده معمولاً در تماس با سطح میله سوخت قرار داشته و گرما را از آن دریافت می‌کند. مقدار گرمای منتقل شده در این حالت از قانون سرمایش نیوتن محاسبه می‌گردد:

$$q = hA(T_w - T_f) \quad (۳-۷)$$

در این رابطه، h ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی است که مقدار آن با توجه به اینکه به عنوان شرایط مرزی و رابط میان سیال و جامد خواهد بود، بایستی به دقت تعیین گردد. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی به مشخصات فیزیکی جریان، مشخصات هندسی سیستم و شرایط کاری سیال مانند سرعت و فشار بستگی دارد. خنک‌کننده در گستره مورد نظر در دو حالت تک‌فاز و دوفاز ممکن است وجود داشته باشد. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی معمولاً با استفاده از روابط تجربی تعیین می‌شود که بر اساس رژیم‌های جریان سیال و سایر شرایط تغییر می‌کند. بنابراین اولین و مهم‌ترین موضوعی که برای تخمین این پارامتر مطرح می‌گردد، تعیین رژیم‌های جریان است. بر این اساس قبل از شروع جوشش و تشکیل اولین حباب پایدار در سیال، خنک‌کننده در حالت تک‌فازی و مایع قرار دارد. در این حالت، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی از روابط ساده مربوط به سیال تک‌فازی تعیین می‌گردد. رابطه مورد استفاده در اینجا، رابطه دایتوس-بولتر^۱ است [۶]:

$$h_{DB} = 0.023 Re_1^{0.8} Pr_1^{0.4} \frac{k_1}{D_h} \quad (۴-۷)$$

¹Dittus-Boelter

در رابطه (۴-۷)، Re و Pr اعداد بدون بعد رینولدز و پرنتل، k ضریب رسانش حرارتی مایع و D_h قطر هیدرولیکی مقطع عبور جریان است. در شرایط تک‌فازی خواص در دمای توده سیال تعیین می‌گردد. اعداد بدون بعد مذکور عبارتند از:

$$Re_1 = \frac{\rho v D_h}{\mu} \quad (۵-۷)$$

$$Pr_1 = \frac{\mu C_p}{k} \quad (۶-۷)$$

با تشکیل اولین حباب در روی سطح در تماس با سیال، جوشش شروع می‌شود. این جوشش ضریب انتقال حرارت را به مقدار قابل توجهی افزایش می‌دهد. در این حالت با وجود تشکیل حباب بر روی سطح جامد، توده سیال در دمای مادون سرد قرار دارد. برای تشکیل حباب در سطح لازم است دمای سطح از دمای اشباع بیشتر گردد، در غیر این صورت حباب نمی‌تواند از سطح به توده سیال بیاید و پس از رشد کردن و جدا شدن از سطح فرو می‌پاشد. این امر منجر به مقدار غیر صفر کوچکی برای کسر خلأ در سیال می‌شود. با افزایش حرارت داده شده به سیال، این حباب‌ها رشد کرده و به توده سیال نفوذ می‌کنند. بنابراین کسر خلأ در این ناحیه افزایش چشمگیری خواهد داشت. این فرایند تا زمانی که توده سیال به دمای اشباع برسد ادامه داشته و پس از آن کسر خلأ تا زمان رسیدن به شرایط تعادل افزایش می‌یابد. با رسیدن دمای توده سیال به دمای اشباع، جوشش به صورت اشباع^۱ صورت می‌گیرد.

پس از دوفازی شده جریان سیال در این کد ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی در جریان دوفازی از طریق رابطه تجربی چن^۲ بدست خواهد آمد. بر این اساس فرض می‌شود که این ضریب از مجموع دو جمله مربوط به انتقال حرارتی جابه‌جایی، h_c و جوشش حبابی h_{NB} تشکیل شده است:

$$h_{conv_{tp}} = h_c + h_{NB} \quad (۷-۷)$$

ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی از رابطه دایتوس-بولتر تغییر یافته تعیین می‌گردد:

¹ Saturated boiling

² Chen

$$h_c = F \frac{0.023k}{D} \left[\frac{\rho V(1-x)D}{\mu} \right]^{0.8} \left[\frac{C_p \mu}{k} \right]^{0.4} \quad (۸-۷)$$

در این رابطه F برابر است با:

$$F = 2.35 \times (X_{tt}^{-1} + 0.213)^{0.736}, X_{tt}^{-1} = \left(\frac{x}{(1-x)} \right)^{0.9} \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_g}{\mu_f} \right)^{0.1} \quad (۹-۷)$$

بخش انتقال حرارت جوشش حبابی نیز به صورت زیر تعیین می‌گردد:

$$h_{NB} = 0.00122 \left[\frac{k^{0.79} C_p^{0.45} \rho^{0.49} g^{0.25}}{\sigma^{0.5} \mu^{0.29} h_{fg}^{0.24} \rho_g^{0.24}} \right] (T_{wall} - T_{sat})^{0.24} \quad (۱۰-۷)$$

$$(P(T_{wall}) - P(T_{sat}))^{0.75} \times S$$

$$S = \begin{cases} (1 + 0.12 Re_{TP})^{-1.14}, & Re_{TP} < 32.5 \\ (1 + 0.42 Re_{TP}^{0.78})^{-1}, & 32.5 \leq Re_{TP} < 70 \\ 0.0797, & Re_{TP} \geq 70 \end{cases} \quad (۱۱-۷)$$

$$Re_{TP} = \min(70, Re_f \times F^{1.25} \times 10^{-4})$$

فاکتور F به منظور وارد نمودن اثرات توربولنسی جریان تعریف شده در حالیکه S با عنوان عامل فرونشانی^۱ شناخته می‌شود (سایر پارامترها مشابه قبل تعریف می‌شوند). رابطه (۱۱-۷) مزیت قابل استفاده بودن در کل رژیم جوشش را دارد [۷].

۷-۳- مدل انتقال حرارت گپ سوخت و غلاف

در طراحی میله‌های سوخت، معمولاً یک فضای خالی میان سوخت و غلاف در نظر گرفته می‌شود که از گازها پر شده است. این گازها از نوع گازهای خنثی نظیر هلیوم است که به تدریج و در اثر فرسایش سوخت، گازهای دیگری

^۱ Suppression factor

همانند زینان، کریپتون و ... به آن اضافه می‌شود. غلظت این عناصر در اثر مصرف سوخت دچار تغییر خواهد شد که این تغییر، منجر به تغییر کسر مولی و در نتیجه تغییر ضریب انتقال حرارت در این ناحیه می‌شود.

در کد ARAS1.0 برای محاسبه انتقال حرارت در فاصله میان سوخت و غلاف می‌توان از دو مدل مقدار ثابت و متغیر استفاده نمود. در مواردی که این ضریب متغیر است از مدل کالزا-بینی^۱، برای محاسبه ضریب انتقال حرارت استفاده خواهد شد که در این مدل، ضریب انتقال حرارت گپ، با کسر مولی گازها متناسب است و کسر مولی نیز با تغییرات غلظت عناصر متناسب است. بنابراین در ابتدا غلظت مربوط به هر یک از گازها را محاسبه کرده و سپس کسر مولی بدست آورده می‌شود. بعد از محاسبه کسرهای مولی عناصر مختلف، ضریب انتقال حرارت با استفاده از مدل فوق محاسبه می‌گردد.

در مواردی که سوخت در حالت تازه می‌باشد فقط کسر مولی هلیوم در نظر گرفته می‌شود. در صورت معلوم بودن ضرایب کسر مولی سایر گازهای موجود در گپ می‌توان در ورودی کد، آنها را وارد کرد. وقتی که گازهای حاصل از شکافت وارد گپ می‌شوند، به دلیل افزایش چگالی اتمی و تغییر فشار گاز، خاصیت پارامترهای داخل آن دچار تغییر شده و ضریب انتقال حرارت در نقاط مختلف به دلیل تغییر فشار متفاوت خواهد بود. در چنین حالتی، ضریب انتقال حرارت گپ به صورت زیر قابل بیان خواهد بود:

$$h_g = h_{g.open} + h_{g.contact} \quad (12-7)$$

در این رابطه، $h_{g.open}$ ضریب انتقال حرارت گپ در جایی که غلاف به سوخت نچسبیده است، می‌باشد و از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$h_{g.open} = \frac{k_{gas}}{\delta_{eff}} + \frac{\sigma}{\frac{1}{\epsilon_f} + \frac{1}{\epsilon_c} - 1} \frac{T_{fo}^4 - T_{ci}^4}{T_{fo} - T_{ci}} \quad (13-7)$$

در این رابطه T ، دما، δ_{eff} ضخامت موثر، ϵ ضریب صدور و σ ، ثابت استفان-بولتزمن است. ضریب هدایت حرارتی گاز k_{gas} بوده و از رابطه زیر بدست می‌آید:

¹ Calza-Bini

$$k_{gas} = (k_1)^{X_1} (k_2)^{X_2} \dots \quad (14-7)$$

ضریب هدایت حرارتی هریک از گازهای محصول شکافت k_i بوده و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$k_i = A_i \times T_g^B \quad (15-7)$$

A و B مقداری ثابت می‌باشند که مقدار آنها برای هر یک از گازها در جدول شماره (۱) آمده است. T_g دمای متوسط گپ می‌باشد که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$T_g = \frac{T_{fo} + T_{ci}}{2} \quad (16-7)$$

دمای سطح خارجی سوخت و دمای سطح داخلی غلاف T_{fo} و T_{ci} می‌باشند. X ، کسر مولی مربوط به هر گاز بوده و از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$X_i = \frac{n_i}{n_{tot}} \quad (17-7)$$

n_i ، در این رابطه غلظت هر گاز و n_{tot} ، مجموع غلظت تمام ایزوتوپ‌ها می‌باشد.

جدول شماره ۱: مقادیر ثابت‌های A و B برای گازها

شماره	گاز	$A(W/K^2.m)$	B
۱	Helium	۰/۰۰۲۶۴	۰/۷۰۸۵
۲	Argon	۰/۰۰۰۲۹۹	۰/۷۷۲۴
۳	Krypton	۰/۰۰۰۰۸۲۵	۰/۸۳۶۳
۴	Xenon	۰/۰۰۰۰۴۲۵	۰/۸۶۱۶
۵	Hydrogen	۰/۰۰۱۱	۰/۸۷۸۵
۶	Nitrogen	۰/۰۰۰۵۳۱	۰/۶۸۹۸
۷	Oxygen	۰/۰۰۰۱۸۵	۰/۸۷۲۹

δ_{eff} ، ضخامت موثر می‌باشد که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\delta_{eff} = \delta_{gap} + \delta_{jump1} + \delta_{jump2} \quad (18-7)$$

δ_{gap} ، ضخامت میانگین گپ است. همچنین $\delta_{jump1} + \delta_{jump2}$ برابر است با:

$$\delta_{jump1} + \delta_{jump2} = \frac{0.024688 k_g T_g^{0.5}}{P_g \sum_i f_i a_i M_i^{-0.5}} \quad (19-7)$$

a_i برابر خواهد بود با:

$$a_i = a_{He} + \frac{(M_i - M_{He})}{(M_{Xe} - M_{He})} (a_{Xe} - a_{He}) \quad (20-7)$$

a_{Xe} و a_{He} نیز از رابطه زیر بدست می‌آیند:

$$a_{He} = 0.425 - 2.3 \times 10^{-4} T_g \quad (21-7)$$

$$a_{Xe} = 0.740 - 2.5 \times 10^{-4} T_g \quad (22-7)$$

σ : ثابت استفان-بولتزمن، که مقدار آن $(W/m^2K^4) \cdot 10^{-8} \times 5.67$ می‌باشد. ϵ_f و ϵ_c ، ضرایب صدور سوخت و غلاف و d_{ox} ضخامت لایه اکسیدی روی سطح داخلی غلاف می‌باشند که به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$\epsilon_f = 0.86 \quad (23-7)$$

$$\epsilon_c = 0.3256 + 1.24 \times 10^{-5} d_{ox} \quad (24-7)$$

d_{ox} در سوخت تازه برابر با صفر است. همچنین $h_{g.contact}$ ضریب انتقال حرارت گپ در جایی است که سوخت به غلاف چسبیده است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$h_{g.contact} = c \frac{2 k_f k_c}{k_f + k_c} \frac{P_i}{H \sqrt{\delta_{gap}}} \quad (25-7)$$

که در آن:

C: مقدار ثابت برابر با $10 \text{ (ft}^{-1/2}\text{)}$

k_f و k_c ضریب هدایت سوخت و غلاف می‌باشند که مقادیر آنها تابعی از درجه حرارت سوخت و غلاف در نظر گرفته شده است. P_i فشار ثابت سطح می‌باشد (در این قسمت فرض می‌شود که از فشار تماسی صرف نظر شود). همچنین H ، عدد سختی مربوط به غلاف است.

۷-۴- مدل سازی شار حرارتی بحرانی

به منظور تعیین دمایی که در آن شار حرارتی بحرانی اتفاق می‌افتد بایستی از روابط مربوط به آن استفاده نمود. این نقطه می‌تواند به میزان قابل ملاحظه‌ای منجر به افزایش دمای سطح دیواره گردد. رابطه مورد استفاده برای محاسبه نقطه‌ای که در آن شار حرارتی بحرانی اتفاق می‌افتد، عبارت خواهد بود:

$$q_{CHF}'' = \frac{1}{0.0036} \frac{AF_A - x_{in}}{CF_C F_g F_{nu} + \left(\frac{h - h_{in}}{0.0036 q'' h_{fg}} \right)} \quad (۲۶-۷)$$

$$A = 0.5328 P_r^{0.1212} (0.0036 G)^{(-0.3040 - 0.3285 P_r)}$$

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

در رابطه (۲۶-۷)، ضرایب F_A ، F_C ، F_g و F_{nu} ضرایب تصحیح برخی از مشخصات هستند که مقادیر آنها برابر با یک در نظر گرفته می‌شوند. q'' شار حرارتی در نقطه مورد نظر، G شار جرمی، P_r فشار کاهش یافته (نسبت فشار سیستم به فشار بحرانی)، h آنتالپی سیال، h_{in} و x_{in} آنتالپی و کیفیت بخار در ورودی و h_{fg} آنتالپی تبخیر است. همچنین با در نظر گرفتن نگهدارنده سوخت ضریب F_g برابر خواهد شد با:

$$F_g = 1.3 - 0.3k_g \quad (۲۷-۷)$$

که در آن، K_g برابر با ضریب افت نگهدارنده است. شار حرارتی بحرانی به عنوان بخش انتهایی محاسبات ترموهیدرولیکی و برای هر کانال محاسبه می‌شود که با توجه به اینکه هر کانال از تعدادی میله سوخت تشکیل شده است از فرایند کمینه‌گیری برای به دست آوردن مقدار نهایی این پارامتر استفاده خواهد شد.

فرایند محاسبه کمینه مقدار برای شار حرارتی بحرانی یک کانال بدین صورت است که ابتدا برای هر کانال و میله متناظر با آن، بر اساس شار حرارتی تولیدی و پارامترهای کانال، مقدار شار حرارتی بحرانی محاسبه می‌شود و سپس با توجه به مقدار محاسبه شده برای تمام میله‌های یک کانال، مقدار کمینه این پارامتر به عنوان شار حرارتی بحرانی آن کانال در نظر گرفته می‌شود. در صورتی که شار تولیدی یک میله برابر صفر باشد مقدار شار حرارتی بحرانی متناظر با آن میله برابر عددی ثابت در نظر گرفته شده است.

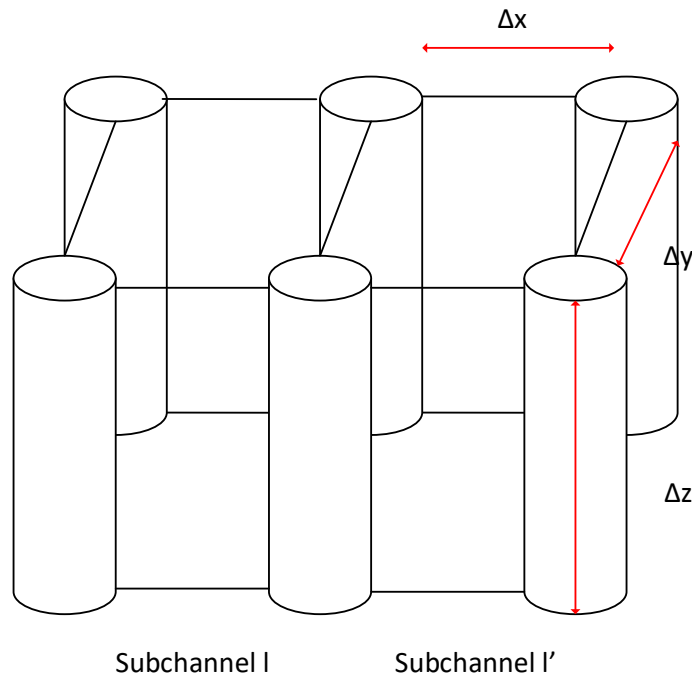
همچنین پس از محاسبه مقدار شار حرارتی بحرانی هر کانال، برای تعیین DNBR از نسبت شار حرارتی بحرانی به شار حرارتی میله سوخت استفاده می‌شود. بنابراین مقدار DNBR برای هر میله سوخت تعیین می‌شود. برای تعیین این پارامتر نیز مقدار کمینه در کد گزارش می‌گردد. علاوه بر آن شماره کانالی که این مقدار کمینه در آن رخ می‌دهد نیز در خروجی گزارش می‌گردد.

۸- شبکه‌بندی و گسسته‌سازی معادلات

پس از ارائه روابط اصلی و کمکی مورد استفاده برای هر یک از اجزاء سوخت و سیال در بخش‌های پیشین، مدل‌سازی ریاضی مسئله کامل گردیده است. هرچند با توجه به نیاز به یافتن پاسخ معادلات برای هر یک از این اجزاء، لازم است علاوه بر مدل‌سازی ریاضی روش عددی مناسبی برای حل معادلات به کار گرفته شود چرا که حل تحلیلی مدل ریاضی ارائه شده امکان پذیر نیست. بر این اساس در این بخش جزئیات مدل‌سازی عددی شرح داده خواهد شد. اولین مرحله از توسعه مدل عددی، گسسته‌سازی دامنه مسئله است. این گسسته‌سازی به این معنا است که قبل از حل معادلات، هندسه مسئله بایستی به بخش‌های کوچک‌تری تقسیم گردد. این تقسیم‌بندی به این خاطر انجام می‌شود که بررسی تک تک نقاط مسئله و یافتن پارامترهای آن امکان‌پذیر نیست. از این رو با تقسیم کردن هندسه به بخش‌های پایه‌ای و یافتن پارامترها برای آنها، می‌توان فرض کرد که پارامترهای تعیین شده در هر یک از این بخش‌ها ثابت بوده و نشان‌دهنده رفتار متوسط هر یک از نقاط در آن بخش می‌باشد.

۸-۱- شبکه‌بندی و گسسته‌سازی معادلات سیال

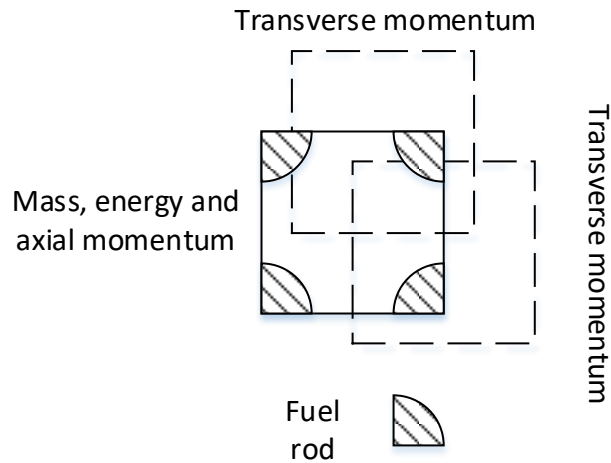
در روش زیرکانال که مبنای محاسبات انجام شده در این پروژه است، مسیر عبور سیال در قلب راکتور از میان کانال‌هایی تعریف می‌گردد که با میله‌های سوخت در ارتباط هستند. این کانال‌ها به تعدادی حجم کنترل تقسیم شده و پارامترهای سیال مانند دما و چگالی به صورت مقادیر متوسط در هر حجم تعیین می‌گردد. در کد ARAS1.0 از مش‌بندی سیال در مرکز استفاده شده است که نمای ساده‌ای از این حجم‌بندی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: نمونه مش‌بندی کانال‌های سیال در روش زیرکانال با رویکرد سیال در مرکز

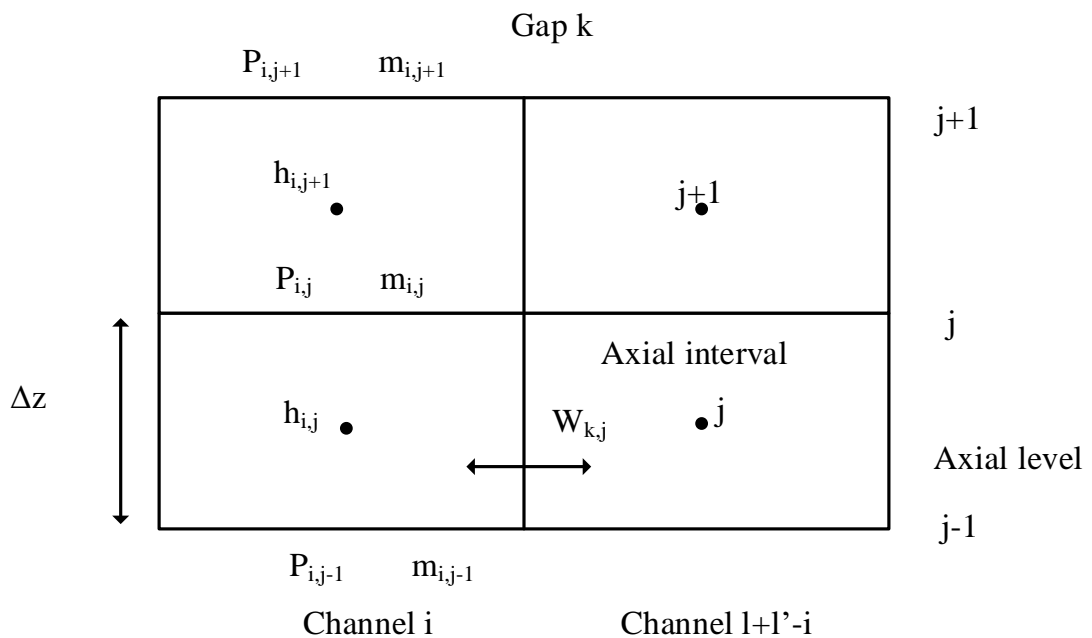
بدین ترتیب کانال‌های مجتمع سوخت تعیین شده و معادلات بقا برای هر یک از حجم‌های کنترلی تعیین می‌گردد. در هر کانال حجم کنترل برای گسسته‌سازی معادلات بقای انرژی، جرم و مومنتوم در شکل ۴ نمایش داده شده است.

همانگونه که اشاره شد، تحلیل ترموهیدرولیکی در کد ARAS1.0 در یک آرایشی از کانال‌های موازی احاطه شده به وسیله میله‌های سوخت استوانه‌ای و فضاهای خالی انجام می‌شود. جهت محوری (محور Z) موازی با کانال‌ها فرض شده و محور Z در حالت کلی محور عمودی و در جهت پایین به بالا در قلب می‌باشد. برای تخمین معادلات دیفرانسیلی، جریان کانال‌ها به فواصل محوری توسط صفحات نرمال در محور Z تقسیم می‌شوند (شکل ۵).



شکل ۴: حجم کنترل در نظر گرفته شده برای معادلات بقا

حجم‌ها به وسیله صفحات محوری و حاشیه‌های جانبی کانال احاطه شده‌اند. در واقع این حجم‌های کنترل مانند شبکه‌های سه بعدی و سلول‌های محاسباتی جهت معادلات بقای جرم، انرژی و مومنتوم تشکیل شده‌اند. هر حجم به وسیله یک اندیس کانال i ($i=1,2,\dots,I$) و به وسیله یک فاصله محوری z مشخص شده است. مطابق قرارداد، z مرز بالایی فاصله محوری z ام می‌باشد.



شکل ۵: حجم کنترل در نظر گرفته شده برای معادلات بقا(نمای جانبی)

نحوه تقسیم‌بندی کانال‌های عبور جریان در کد بدین صورت است که در فاصله عرضی میان دو کانال مجاور یک جهت دلخواه در نظر گرفته می‌شود و بر این اساس ورود جریان عرضی به یک کانال جهت مثبت و خروج جریان عرضی از یک کانال جهت منفی این جریان را ایجاد می‌کند. بدین ترتیب دو کانال مجاور 1 و 1' از طریق مرزی با نام k به یکدیگر مرتبط می‌شوند. یک جریان عرضی مثبت از کانال 1 به کانال 1' به گونه‌ای صورت می‌گیرد که در آن اندیس کانال 1 از کانال 1' کوچکتر باشد. همچنین هر جریان عرضی با عبور از مرز k، جهت اولیه خود را از دست می‌دهد. بنابراین زیرکانال‌ها می‌توانند بدون هیچ جهت‌گیری خاصی با یکدیگر در ارتباط قرار گیرند. در تقریب زیرکانال، فرض می‌شود که جهت جریان عرضی بین دو کانال مجاور فقط به وسیله اختلاف فشار و یا آنتالپی تعیین می‌شود. بنابراین، e_{ik} بردار یکه جریان‌های عرضی برای کانال‌های 1 و 1' به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$e_{ik} = \begin{cases} 1, & 1 < 1' \\ -1, & 1 > 1' \end{cases} \quad (1-8)$$

با توصیفات ارائه شده، فرم تفاضل محدود معادلات بقا برای کانال i در فاصله محوری z به صورت زیر نوشته می‌شود.

- معادله بقای جرم

$$\dot{m}_{ij} - \dot{m}_{ij-1} + \Delta z_j \sum_{k \in i} e_{ik} w_{kj} = 0 \quad (2-8)$$

- معادله بقای انرژی

$$\frac{1}{\Delta z_j} (\dot{m}_{ij} h_{ij}^* - \dot{m}_{ij-1} h_{ij-1}^*) + \sum_{k \in i} e_{ik} w_{kj} h_{kj}^* = \sum_{r \in i} P_r \Phi_{ir} q''_{rj} - \sum_{k \in i} w'_{kj} (h_{ij} - h_{nj}) - \sum_{k \in i} C_k s_k (T_{ij} - T_{nj}) + \sum_{r \in i} r_Q \Phi_{ir} q'_{rj} \quad (3-8)$$

در این رابطه:

$h_{ij}^* =$ آنتالپی سیال جاری در فاصله محوری z که به عنوان آنتالپی سیال ورودی به حجم کنترل در جهت محوری می‌باشد، به طوریکه:

$$h_{ij}^* = \begin{cases} h_{ij}, m_{ij} \geq 0 \\ h_{ij+1}, m_{ij} < 0 \end{cases} \quad (4-8)$$

همچنین:

$h_{ij}^* =$ آنتالپی سیال جاری برای مرز k به عنوان آنتالپی ورودی به حجم کنترل است که:

$$h_{kj}^* = \begin{cases} h_{ij}, e_{ik} w_{kj} \geq 0 \\ h_{nj}, e_{ik} w_{kj} < 0 \end{cases} \quad (5-8)$$

- معادله بقای مومنتوم محوری

$$m_{ij} u'_{ij} - m_{ij-1} u'_{ij-1} + \Delta z_j \sum_{k \in i} e_{ik} w_{kj} u'_{kj} = -A_i (P_{ij} - P_{ij-1}) - g A_i \Delta z_j \rho_{ij} \cos \theta - \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta z f_w \phi^2}{D_h \rho_1} + k' v' \right) |m_{ij}| \frac{m_{ij}}{A_i} - f_T \Delta z_j \sum_{k \in i} w'_{kj} (u'_{ij} - u'_{nj}) \quad (6-8)$$

بین دو کانال مجاور l و l' ، مقدار سرعت u'_{kj}^* روی مرز k ، به شکل زیر تعیین می‌گردد.

$$u'_{kj}^* = \begin{cases} u'_{ij}, e_{ik} w_{kj} \geq 0 \\ u'_{nj}, e_{ik} w_{kj} < 0 \end{cases} \quad (7-8)$$

- معادله بقای مومنتوم جانبی

$$\bar{u}'_{kj} w_{kj}^* - \bar{u}'_{kj-1} w_{kj-1}^* = \frac{s_k}{l_k} \Delta z_j (P_1 - P_1)_{j-1} - \frac{1}{2} \left(K_G \frac{\Delta z v'^*}{sl} \right)_{kj} |w_{kj}| w_{kj} \quad (8-8)$$

در این رابطه، مقدار اختلاف فشار در دو طرف گپ در مقطع ورودی کانال‌ها در نظر گرفته می‌شود. همچنین:

$$w_{kj}^* = \begin{cases} w_{kj}, \bar{u}'_{kj} > 0 \\ w_{kj+1}, \bar{u}'_{kj} < 0 \end{cases} \quad (9-8)$$

که در آن، \bar{u}'_{kj} سرعت متوسط سیال در فاصله k است. سرعت مومنوم برای این مرز به وسیله سرعت‌های میانگین مومنوم کانال l و l' متصل به آن فرض شده است. در واقع:

$$\bar{u}'_k = \frac{1}{2} (u'_{lk} + u'_{l'k}) \quad (10-8)$$

بدین ترتیب فرم گسسته معادلات بقا ارائه شده بایستی پس از مش‌بندی و تعیین کانال‌های عبور سیال با الگوریتم محاسباتی مناسب حل شده تا پارامترهای سیال بدست آید.

۸-۲- شبکه‌بندی و گسسته‌سازی معادلات سوخت

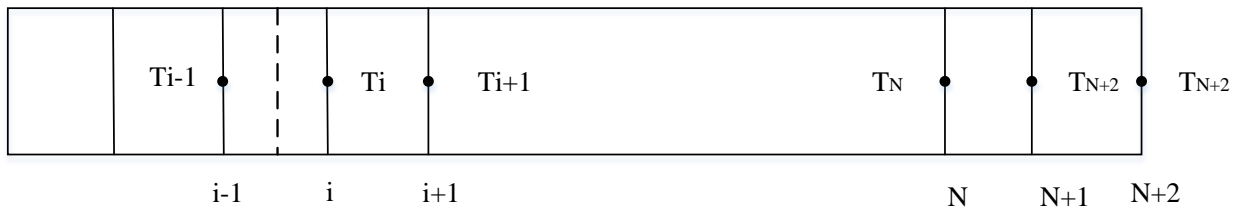
همانگونه که اشاره شد هر یک از کانال‌های جریان سیال به وسیله تعدادی میله سوخت در هر مجتمع احاطه می‌گردد. به عنوان مثال در آرایش مثلثی هر کانال سیال با سه میله سوخت و در آرایش چهار وجهی با چهار میله سوخت در ارتباط خواهد بود. بدین ترتیب در حالت پایا تمام گرمای تولید شده در میله‌های سوخت به خنک‌کننده منتقل می‌گردد. برای محاسبه توزیع دمایی سوخت از معادله رسانش حرارتی استفاده می‌شود. برای محاسبه توزیع دمایی در این اجزاء بایستی الگوریتم محاسباتی مناسبی در نظر گرفت. بر این اساس، فرضیات زیر مورد استفاده قرار گرفته است:

- هندسه میله سوخت در طول زمان محاسبات ثابت خواهد ماند.
- توزیع دمایی به صورت یک بعدی شعاعی در مختصات استوانه‌ای توپر و توخالی خواهد بود.
- مواد تشکیل دهنده میله سوخت می‌توانند خواص ثابت یا وابسته به دما داشته باشند.

بدین ترتیب ابتدا بایستی فرم مناسبی برای مش‌بندی میله سوخت انتخاب نمود. در کد ARAS1.0 دو نوع مش‌بندی برای میله سوخت در نظر گرفته شده است. در مش‌بندی نوع اول، سوخت در جهت شعاعی به تعداد فواصل مساوی تقسیم می‌گردد در حالیکه در گپ و غلاف تنها یک حجم در نظر گرفته می‌شود. مقادیر دمایی در مرزهای هر حجم که در شکل ۶ با i نشان داده شده است تعیین می‌گردد در حالیکه خواص مواد در مرکز هر حجم محاسبه می‌شود.

Properties

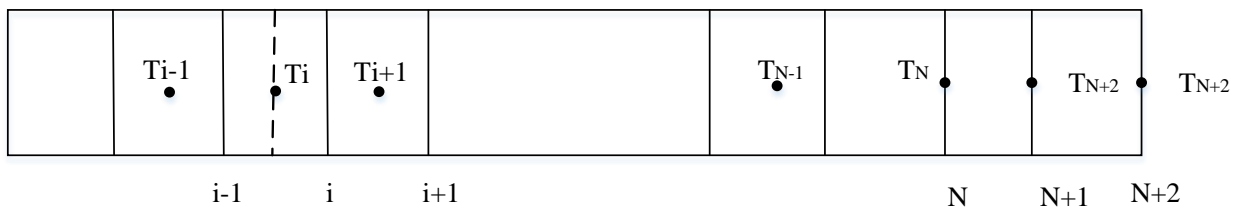
$i-1/2$



شکل ۶: حجم‌بندی میله سوخت در راستای شعاعی (مدل اول)

در مدل دوم برای گسسته سازی، دمای سوخت در مرکز هر حجم تعیین می‌گردد. در این حالت نیز در گپ و غلاف یک حجم در نظر گرفته شده و دما در این دو بخش بر روی سطوح داخلی و خارجی محاسبه می‌شود (شکل ۷).

Properties



شکل ۷: حجم‌بندی میله سوخت در راستای شعاعی (مدل دوم)

حجم‌بندی‌های ارائه شده در این بخش بر اساس حجم‌بندی‌های در نظر گرفته شده به ترتیب برای مدل اول و دوم در کدهای تجاری [۸] RELAP و COBRA انتخاب شده است. بر این اساس فرم گسسته شده معادله رسانش سوخت به شکل زیر خواهد بود:

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_{i-1}} + k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_i} = q''' V_i \quad (۱۱-۸)$$

در این رابطه، V_i ، حجم سلول شماره i است که بر اساس شعاع متوسط تعریف می‌گردد:

$$\bar{r}_i = \frac{1}{\pi(r_i^2 - r_{i-1}^2)} \int_{r_{i-1}}^{r_i} 2\pi r r dr = \frac{2}{3} \frac{r_i^2 + r_{i-1}^2 + r_i r_{i-1}}{r_i + r_{i-1}} \quad (۱۲-۸)$$

با توجه به اینکه هر میله سوخت با بیش از یک کانال در ارتباط است، برای محاسبه دمای سیال و ضریب انتقال حرارت جابجایی باید بر روی کانال‌های مرتبط با هر میله متوسط‌گیری نمود. برای این کار می‌توان نوشت:

$$h_n = \frac{\sum_{l \in n} \Phi_{nl} h_{nl}}{\sum_{l \in n} \Phi_{nl}} \quad (۸-۱۳)$$

$$T_b = \frac{\sum_{l \in n} \Phi_{nl} h_{nl} T_{bl}}{\sum_{l \in n} \Phi_{nl} h_{nl}} \quad (۸-۱۴)$$

در این روابط، n شماره میله مورد نظر و l کانال متناظر با آن میله است. همچنین ضریب Φ_{nl} نشان دهنده بخشی از محیط جانبی میله است که با کانال l در تماس قرار دارد.

۹- شرایط مرزی

همانند تمام مسائل مشابه، برای حل دستگاه معادلات به دست آمده برای سیال لازم است شرایط مرزی تعیین گردد. با توجه به اینکه کد ARAS1.0 محاسبات حالت پایا را در نظر می‌گیرد، مشتقات زمانی در معادلات دیفرانسیل حذف شده و بنابراین مسئله به شرایط اولیه نیاز ندارد. شرایط مرزی مورد نیاز برای حل معادلات سیال شامل تعیین دبی جرمی ورودی به کانال‌ها، دما (آنتالپی) جریان سیال ورودی و فشار در خروجی خواهد بود. لازم به ذکر است، در این نسخه از کد فرض می‌شود که شرایط مرزی برای تمام کانال‌ها یکسان باشد.

از طرف دیگر، برای حل معادله رسانش حرارتی در سوخت، به دو شرط مرزی نیاز است. اولین شرط مرزی، از نوشتن موازنه انرژی بر روی مرز داخلی میله سوخت استفاده می‌شود. در مورد میله‌های سوخت، این شرط مرزی عبارتست از سطح داخلی عایق. در این حالت فرض می‌شود که در سطح داخلی میله سوخت (r_{if}) انتقال حرارت صورت نگیرد. بنابراین برای این سطح خواهیم داشت:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_{if}} = 0 \quad (۹-۱)$$

دومین شرط مرزی مربوط به سطح خارجی میله سوخت است. در سطح خارجی میله سوخت (r_{coc})، یعنی سطح تماس غلاف با خنک‌کننده انتقال حرارت جابه‌جایی صورت می‌گیرد. در این حالت حرارتی که از سطح رسانش می‌شود برابر حرارت جابه‌جا شده با خارج است:

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_{coc}} = h(T_{coc} - T_b) \quad (2-9)$$

در این رابطه، h ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی و T_b دمای توده سیال است و مقدار h با توجه به اینکه به عنوان شرایط مرزی و رابط میان سیال و جامد خواهد بود، بایستی به دقت تعیین گردد. خنک‌کننده در گستره مورد نظر در این کد، در دو حالت تک‌فاز و دوفازی ممکن است وجود داشته باشد. ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی معمولاً با استفاده از روابط تجربی تعیین می‌شود که بر اساس رژیم‌های جریان سیال تغییر می‌کند. مدل ارائه شده برای محاسبه توزیع دمایی سوخت برای دو نوع سوخت توپر و سوخت توخالی (مشابه سوخت راکتور بوشهر) قابل استفاده است.

۱۰- توصیف الگوریتم محاسباتی

مهم‌ترین بخش محاسبات مربوط به تهیه روند محاسباتی مناسب است. این روند بایستی علاوه بر اینکه از دقت کافی برخوردار است تا حد امکان بهینه نیز باشد. در این بخش پیش از تعیین نحوه حل معادلات، تغییراتی در معادلات بقای عنوان شده داده می‌شود تا روند محاسباتی مناسب توسعه داده شود. بدین منظور، ابتدا در معادله بقای مومنتوم جانبی (معادله (۸-۸))، جمله اختلاف فشار بین دو کانال مجاور تصحیح می‌گردد. بر این اساس، مقدار این جمله به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$(P_1 - P_r)_{j-1} = (P_1 - P_r)_j - \Delta z \left[\left(\frac{dp}{dz} \right)_{1,j} - \left(\frac{dp}{dz} \right)_{r,j} \right] \quad (1-10)$$

همچنین برای بهبود همگرایی به جای محاسبه فشار، جمله $(P_1 - P_r)$ به صورت پارامتر مجزای SDP در نظر گرفته می‌شود:

$$SDP_{j-1} = SDP_j - \Delta z \left[\left(\frac{dp}{dz} \right)_{l,j} - \left(\frac{dp}{dz} \right)_{l',j} \right] \quad (2-10)$$

$\left(\frac{dp}{dz} \right)_{l,j}$ گرادیان فشار است که از رابطه تلفیقی به دست آمده از جایگذاری معادله بقای جرم در معادله مومنوم محوری محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} \left(\frac{dP}{dz} \right)_{ij} = & -R_{ij} m_{ij-1}^2 - g \rho_{ij} \cos \theta - \frac{1}{A_i} \sum_{k \in i} \left[e_{ik} w_{kj} u'_{kj} + f_T w'_{kj} (u'_{ij} - u'_{nj}) \right] \\ & + \left[2u'_{ij} + R_{ij} A_i \Delta X_j (m_{ij} + m_{ij-1}) \right] \left(\frac{1}{A_i} \sum_{k \in i} e_{ik} w_{kj} \right) \end{aligned} \quad (3-10)$$

که در آن:

$$R_{ij} = \frac{1}{A_i^2} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{f_w \phi^2}{D_h \rho_l} + \frac{k' v'}{\Delta z} \right)_{ij} + \frac{v'_{ij} - v'_{ij-1}}{\Delta z_j} \right] \quad (4-10)$$

بدین ترتیب بدون نیاز به محاسبه مستقیم فشار می‌توان جریان‌های عرضی را محاسبه نمود. برای این کار ابتدا جریان عرضی با استفاده از معادله مومنوم جانبی به دست می‌آید:

$$\left(\bar{u}'_{kj} + \frac{1}{2} \left(K_G \frac{\Delta z v'^*}{sl} \right)_{kj} \right) |w_{kj}| w_{kj} = \bar{u}'_{kj-1} w_{kj-1}^* + \frac{S_k}{I_k} \Delta z_j (SDP_j - \Delta z \left[\left(\frac{dp}{dz} \right)_{l,j} - \left(\frac{dp}{dz} \right)_{l',j} \right]) \quad (5-10)$$

$$w_{kj} = \frac{\bar{u}'_{kj-1} w_{kj-1}^* + \frac{S_k}{I_k} \Delta z_j (SDP_j - \Delta z \left[\left(\frac{dp}{dz} \right)_{l,j} - \left(\frac{dp}{dz} \right)_{l',j} \right])}{\left(\bar{u}'_{kj} + \frac{1}{2} \left(K_G \frac{\Delta z v'^*}{sl} \right)_{kj} \right) |w_{kj}|} \quad (6-10)$$

پس از قرار دادن این مقدار در معادله (۱۰-۳) به جای w ، افت فشار به صورت دستگاه معادلات مرتبه اول در خواهد آمد:

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{ij} = -R_{ij}m_{ij-1}^2 - g\rho_{ij}\cos\vartheta$$

$$- \frac{1}{A_i} \sum_{k \in i} \left[e_{ik} \frac{\bar{u}'_{kj-1} w_{kj-1}^* + \frac{S_k}{l_k} \Delta z_j (SDP_j - \Delta z \left[\left(\frac{dp}{dz}\right)_{l,j} - \left(\frac{dp}{dz}\right)_{l',j} \right])}{\left(\bar{u}'_{kj} + \frac{1}{2} \left(K_G \frac{\Delta z v'^*}{sl} \right)_{kj} \right) |w_{kj}|} u'_{kj} + f_T w'_{kj} (u'_{ij} - u'_{nj}) \right] \quad (7-10)$$

$$+ [2u'_{ij} + R_{ij} A_i \Delta X_j (m_{ij} + m_{ij-1})]$$

$$\left(\frac{1}{A_i} \sum_{k \in i} e_{ik} \frac{\bar{u}'_{kj-1} w_{kj-1}^* + \frac{S_k}{l_k} \Delta z_j (SDP_j - \Delta z \left[\left(\frac{dp}{dz}\right)_{l,j} - \left(\frac{dp}{dz}\right)_{l',j} \right])}{\left(\bar{u}'_{kj} + \frac{1}{2} \left(K_G \frac{\Delta z v'^*}{sl} \right)_{kj} \right) |w_{kj}|} \right)$$

که در شکل ماتریسی آن برابر خواهد بود با:

$$A \left(\frac{dP}{dz}\right)_{ij} = b \quad (8-10)$$

در این معادله، A ماتریسی است که در آن هر ردیف متعلق به یک زیرکانال بوده و تمامی اجزای آن ردیف به جز قطر اصلی و کانال‌های همسایه آن صفر است. با استفاده از حل این دستگاه معادلات، گرادیان فشار برای تمامی کانال‌ها در سطح محوری z محاسبه می‌شود. پس از آن با استفاده از این مقدار گرادیان فشار می‌توان جریان عرضی را از حل مستقیم معادله بقای مومنتوم جانبی و دبی جریان محوری را با استفاده از معادله بقای جرم به دست آورد. بر این اساس، ابتدا محاسبات برای تمامی کانال‌ها در یک سطح حل و همگرا شده و پس از آن محاسبات در سطح بعدی شروع می‌شود. این کار تا خروجی کانال‌ها ادامه می‌یابد و سپس در خروجی بر اساس شرط مرزی SDP برابر صفر، فشار در تمامی مقاطع طولی محاسبه می‌گردد.

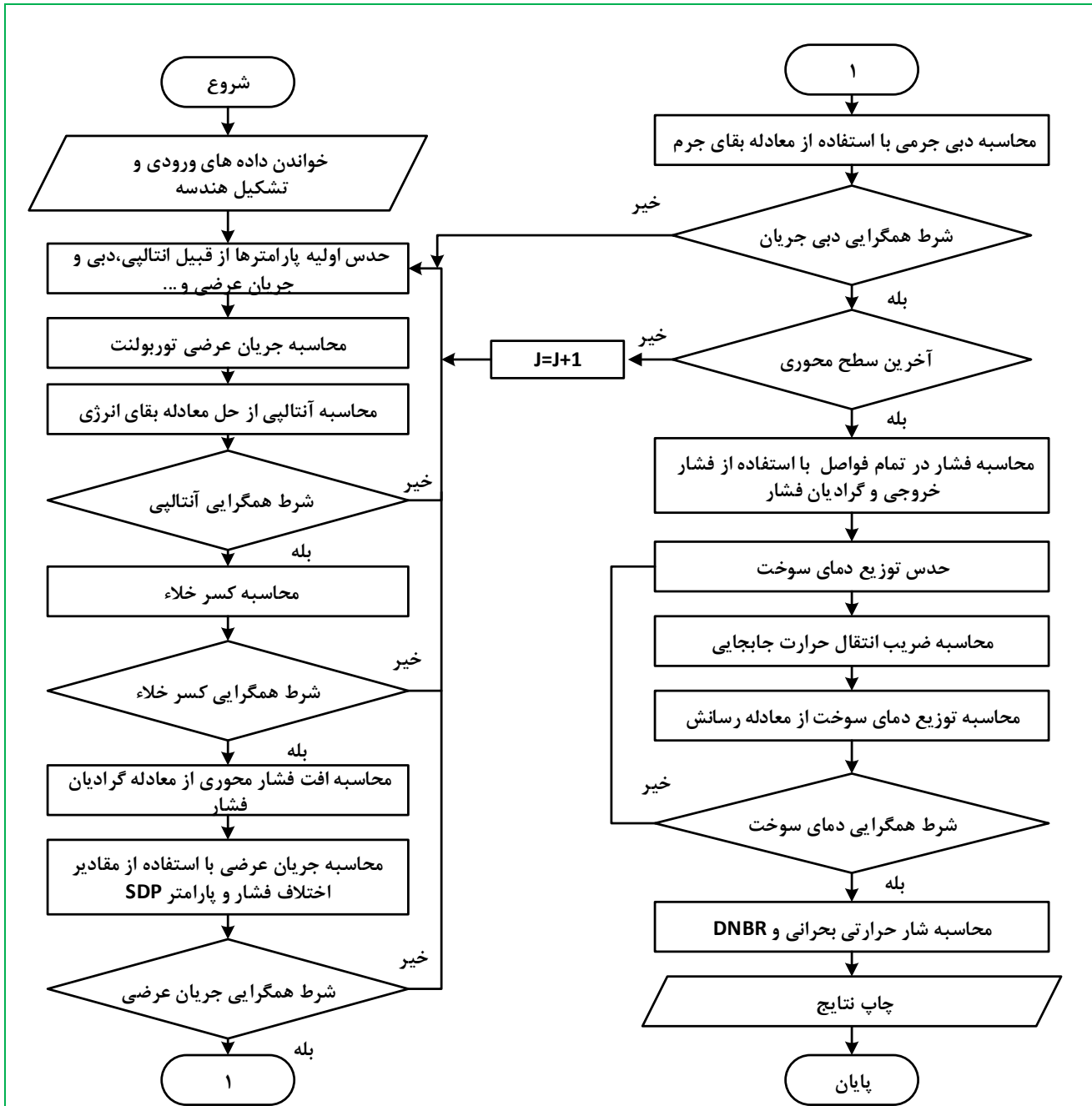
بدین ترتیب کلیه پارامترهای سیال در تمام مقاطع طولی برای همه کانال‌ها با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P_{ij} = P_{i,j-1} + \Delta z \left(\frac{\Delta P}{\Delta z} \right)_{i,j} \quad (9-10)$$

روند محاسبات بر اساس روش تکرار در این کد در نظر گرفته شده است. بر این اساس، ابتدا مجهولات اصلی برای تمام نقاط در مسئله حدس زده می‌شود و سپس در هر بخش تا همگرایی جواب‌ها محاسبات تکرار می‌گردد. در صورت عدم همگرایی در هر مرحله و به منظور انجام دوباره محاسبات پارامتر حدس زده شده با یک فاکتور تصحیح مناسب، تغییر داده می‌شود تا سرعت محاسبات افزایش یابد. در محاسبه پارامترهای ترموهیدرولیکی سیال، کتابخانه خواص ترمودینامیکی IF97 استفاده شده است [۹]. از طرف دیگر، پس از نوشتن فرم جداسازی شده معادله انتقال حرارت رسانش و اعمال شرایط مرزی ذکر شده، توزیع دمای میله سوخت از معادله ماتریسی زیر بدست خواهد آمد:

$$\overline{AT} = b \quad (10-10)$$

که در آن A ماتریس مربعی سه قطری ضرایب، b بردار جواب و T بردار دمایی به شکل $T = [T_1, T_2, \dots, T_I]^T$ است. این دستگاه معادلات، پس از محاسبه ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی با روش حدس و خطا حل می‌گردد. این روند به این صورت خواهد بود که ابتدا با توجه به وابستگی دمایی پارامترهای ساختار حرارتی مانند ضریب رسانش حرارتی و گرمای ویژه در فشار ثابت، پارامتر دما در هر مش حدس زده شده و پس از محاسبه مقادیر ماتریس A و b دمای هر مش محاسبه شده و این الگوریتم تا زمانی که بیشینه خطای نسبی مقادیر حدس زده شده و محاسبه شده به کمتر از یک حد مناسب برسد ادامه خواهد یافت. با تعیین نحوه محاسبات، روند نمای حل معادلات سیال و سوخت در شکل ۸ نمایش داده شده است.



شکل ۸: روند نمای حل معادلات سیال و سوخت در کد ARAS1.0

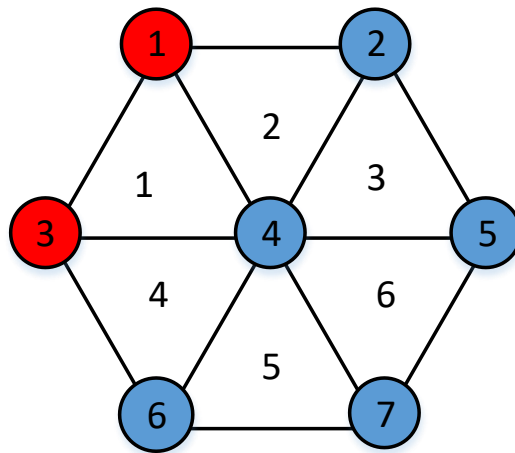
۱۱- نتایج

پس از توصیف نحوه مدل‌سازی چیدمانی از میله‌های سوخت و ارائه روند محاسباتی، در این بخش تعدادی مسئله نمونه به منظور تعیین دقت و صحت نتایج به دست آمده در نظر گرفته شده است. در گزینش این مسائل سعی شده

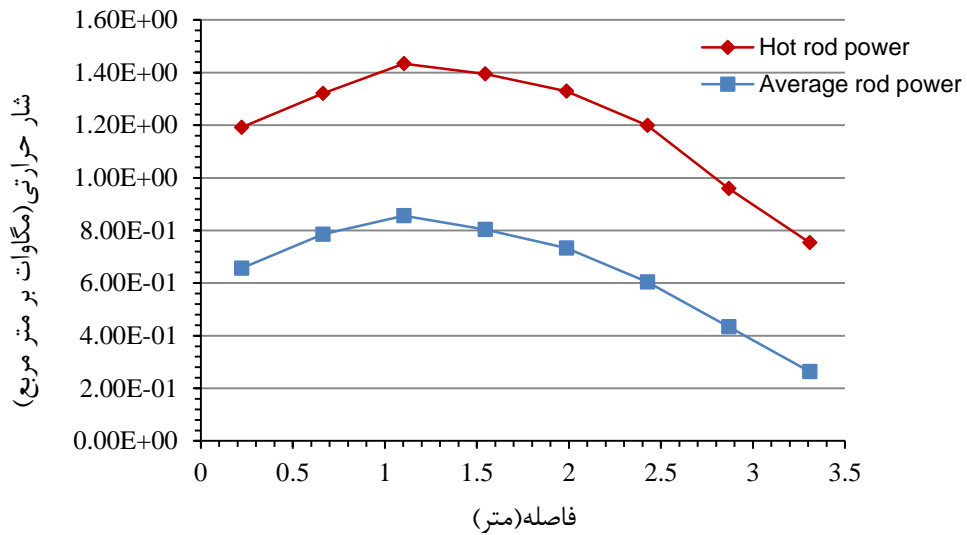
است که طیف گسترده‌ای از شرایط همچون ایجاد جریان دوفازی و آرایش‌های متفاوت اعمال گردد. لازم به ذکر است، برای مقایسه در تمامی مراحل، از نتایج حاصل از کد COBRA-EN نیز استفاده شده است.

۱۱-۱- مسئله شماره ۱

اولین مسئله در نظر گرفته شده برای محاسبات، آرایه‌ای متشکل از هفت میله سوخت به صورت شش وجهی خواهد بود که نمایش ساده‌ای از آن در شکل ۹ نشان داده شده است که تعداد کانال‌های این آرایه برابر ۶ است. همچنین برای این سیستم فرض می‌گردد، سوخت و سیال دارای مشخصات ارائه شده در جدول شماره (۲) باشند. از طرف دیگر، توان اعمالی به تمام میله‌های سوخت به جز میله‌های شماره ۱ و ۳ به صورت یکسان اعمال شده است. برای ایجاد جریان دوفازی در یک کانال، توان در میله‌های مذکور در مقایسه با سایر میله‌ها، مقدار بیشتری در نظر گرفته شده است. توزیع توان محوری که به صورت توزیع کسینوسی نامتقارن است برای میله‌های با توان بیشتر (شماره ۱ و ۳) و میله‌های با توان متوسط (سایر میله‌ها) در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۹: آرایش میله‌ها و کانال‌ها در مسئله شماره ۱

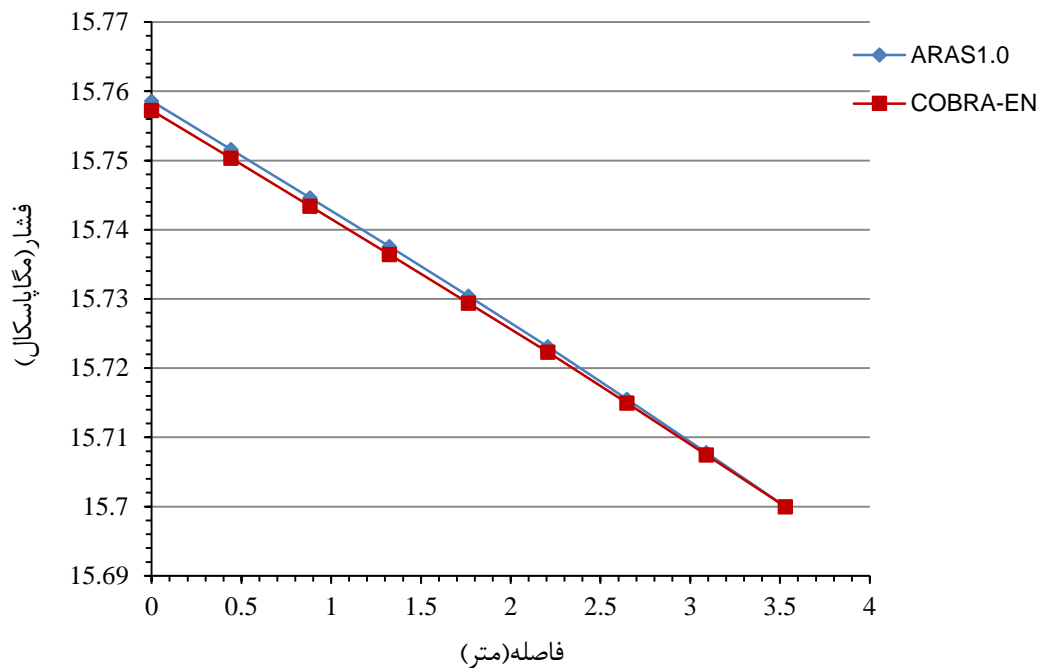


شکل ۱۰: توزیع محوری شار حرارتی در میله‌های داغ و با توان متوسط

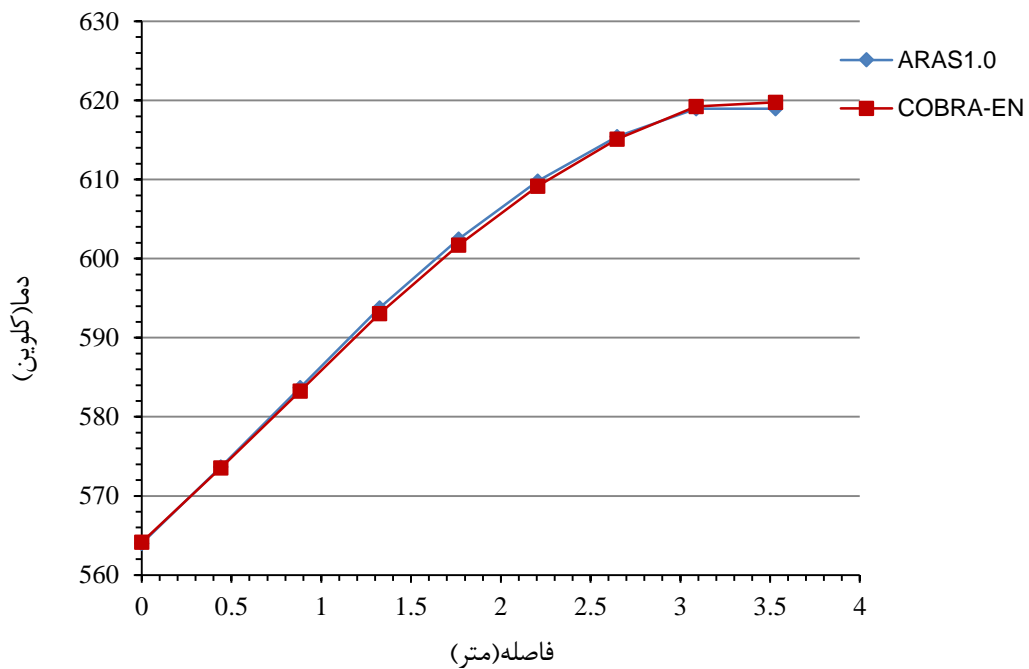
جدول شماره ۲: مشخصات مسئله شماره ۱

شماره	پارامتر	مقدار
۱	دبی جرمی ورودی به هر کانال (کیلوگرم بر ثانیه)	۰/۱۰۹۸
۲	دمای ورودی (کلوین)	۵۶۴
۳	فشار خروجی (مگاپاسکال)	۱۵/۷
۴	تعداد تقسیمات محوری	۸
۵	تعداد تقسیمات شعاعی سوخت	۹
۶	قطر داخلی سوخت (متر)	۰/۰۰۱۵
۷	قطر خارجی سوخت (متر)	۰/۰۰۲۵۷
۸	ضخامت گپ (متر)	۰/۰۰۰۰۸۵
۹	قطر خارجی غلاف (متر)	۰/۰۰۹۱
۱۰	چگالی سوخت (کیلوگرم بر متر مکعب)	۱۰۵۵۰
۱۱	چگالی غلاف (کیلوگرم بر متر مکعب)	۶۵۵۰
۱۲	ضریب انتقال حرارت گپ (وات بر متر مربع. کلوین)	۳۳۰۰
۱۳	مساحت کانال (متر مربع)	۰/۰۰۰۰۳۷۸۷
۱۴	محیط گرم شونده (متر)	۰/۰۱۴۲۹
۱۵	اندازه گام (متر)	۰/۰۱۲۷۵
۱۶	طول میله سوخت (متر)	۳/۵۳

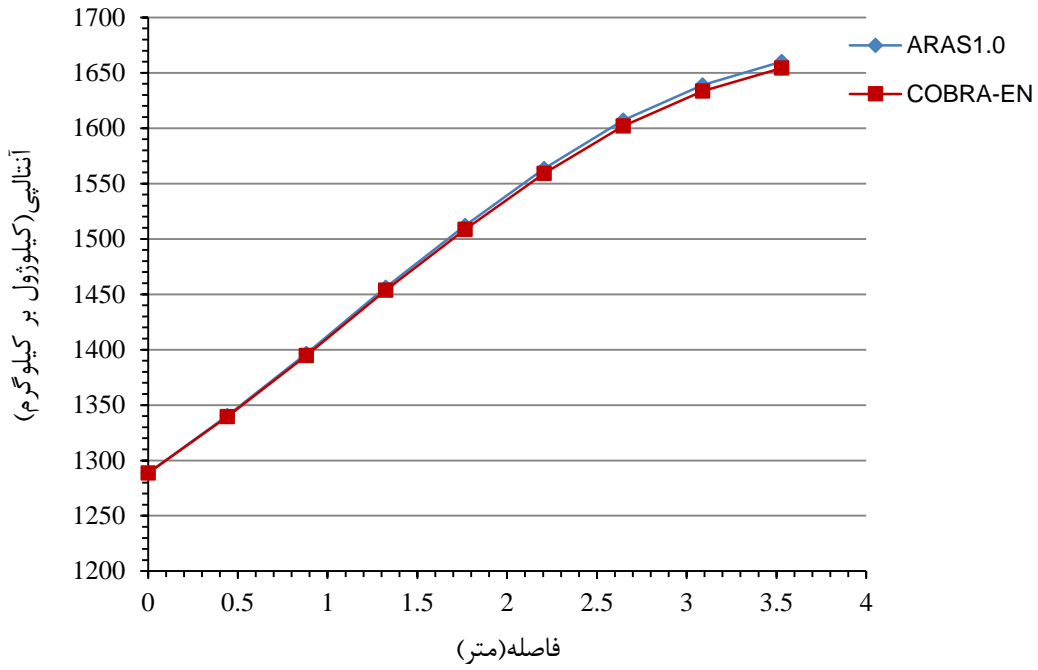
بر اساس موارد ارائه شده برای مسئله مذکور، نتایج حاصل از اجرای کد ARAS1.0 و مدل‌سازی مشابه با کد COBRA-EN در شکل ۱۱ تا شکل ۱۸ برای سیال نشان داده شده است.



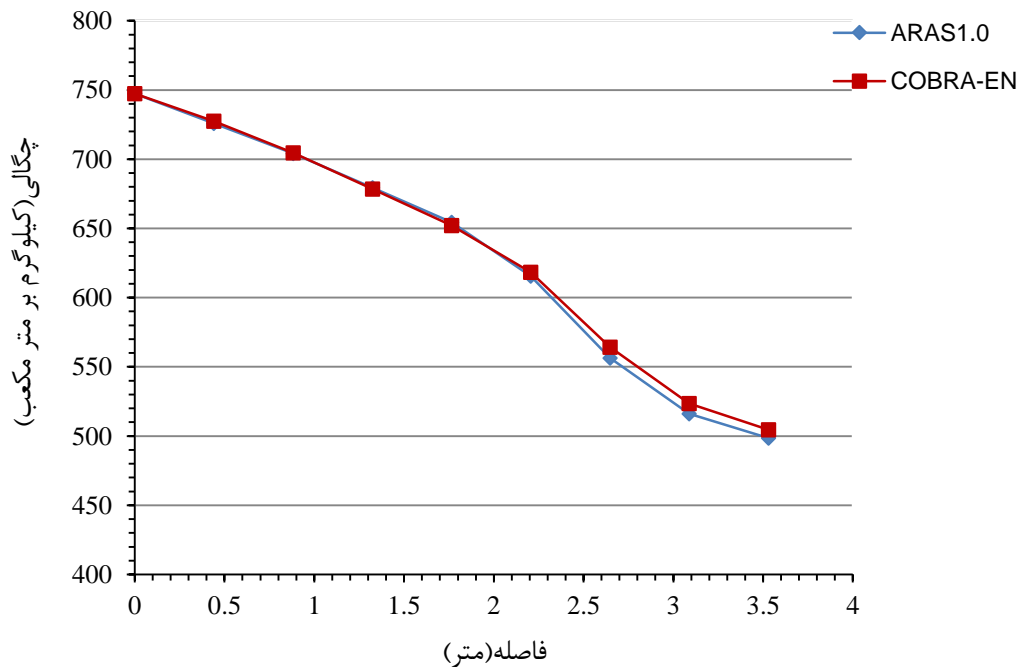
شکل ۱۱: توزیع محوری فشار برای کانال شماره ۱ (کانال داغ)



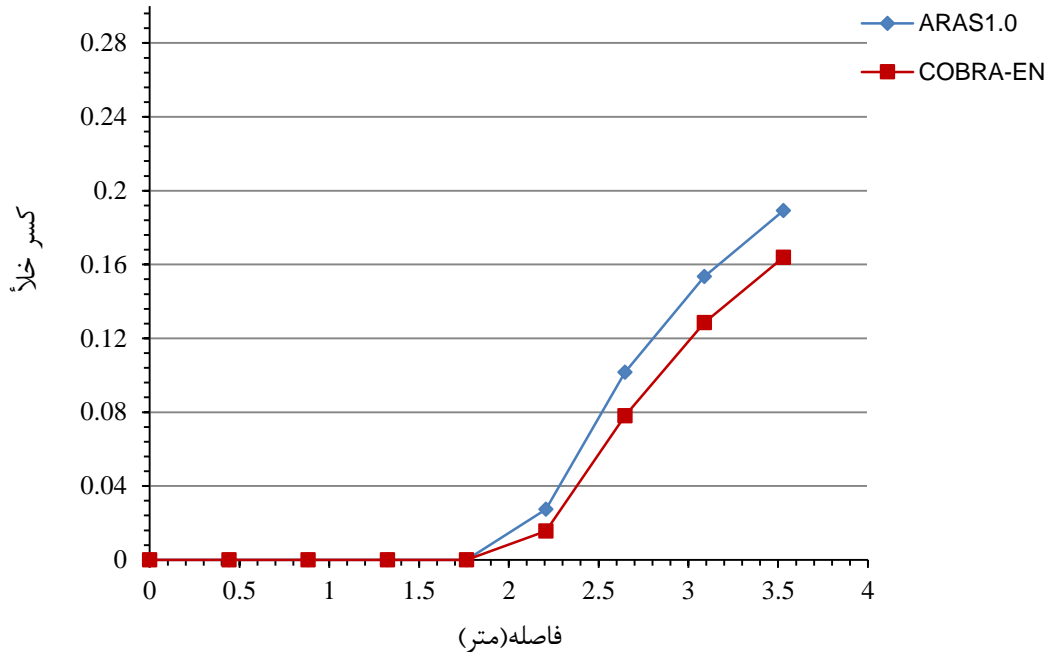
شکل ۱۲: توزیع محوری دمای سیال برای کانال شماره ۱ (کانال داغ)



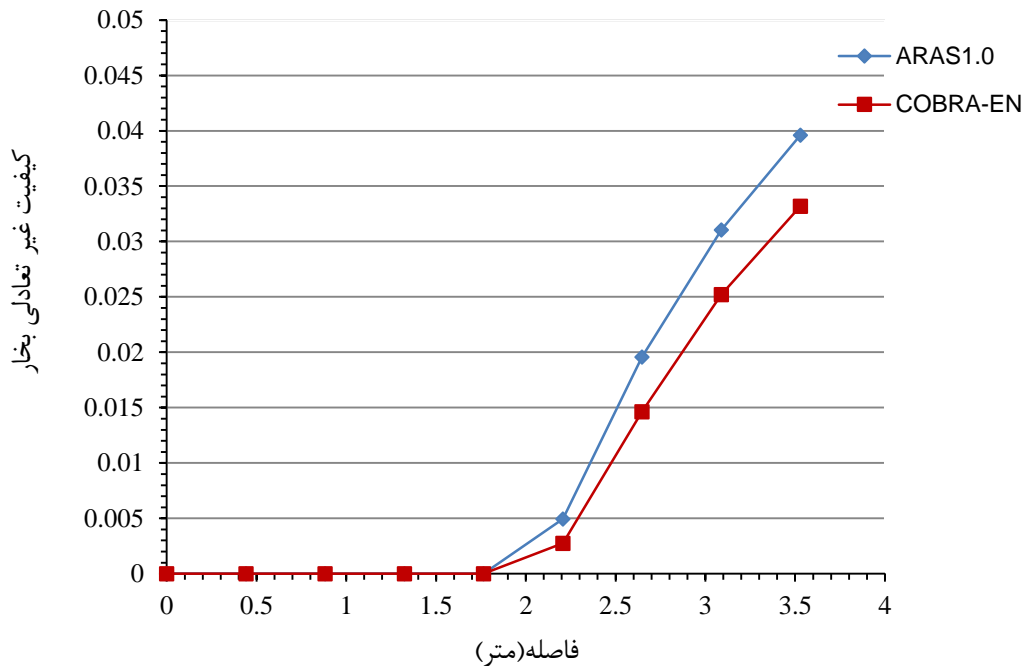
شکل ۱۳: توزیع محوری آنتالپی سیال برای کانال شماره ۱ (کانال داغ)



شکل ۱۴: توزیع محوری چگالی سیال برای کانال شماره ۱ (کانال داغ)

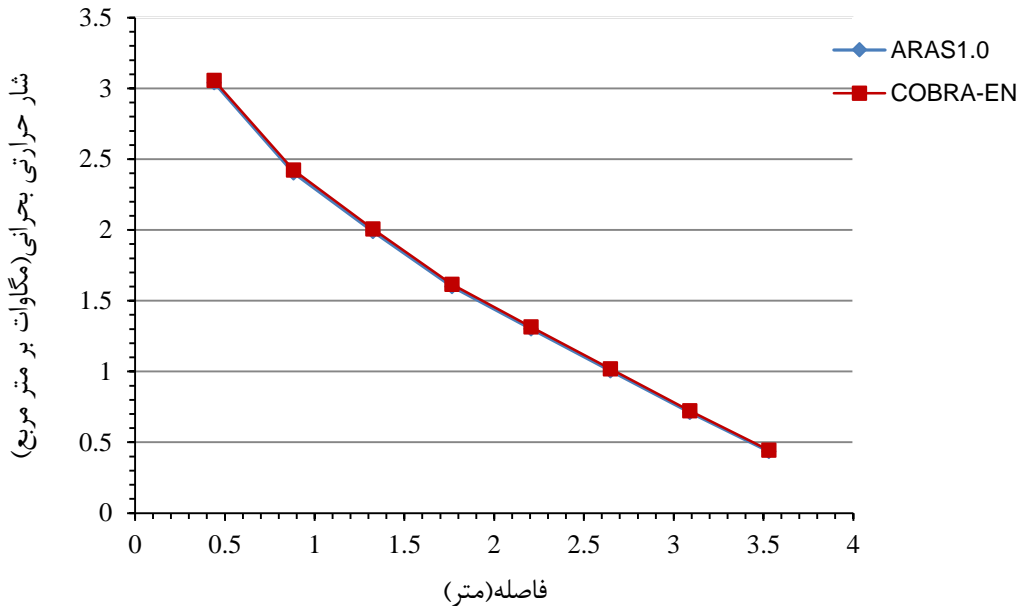


شکل ۱۵: توزیع محوری کسر خلأ برای کانال شماره ۱ (کانال داغ)

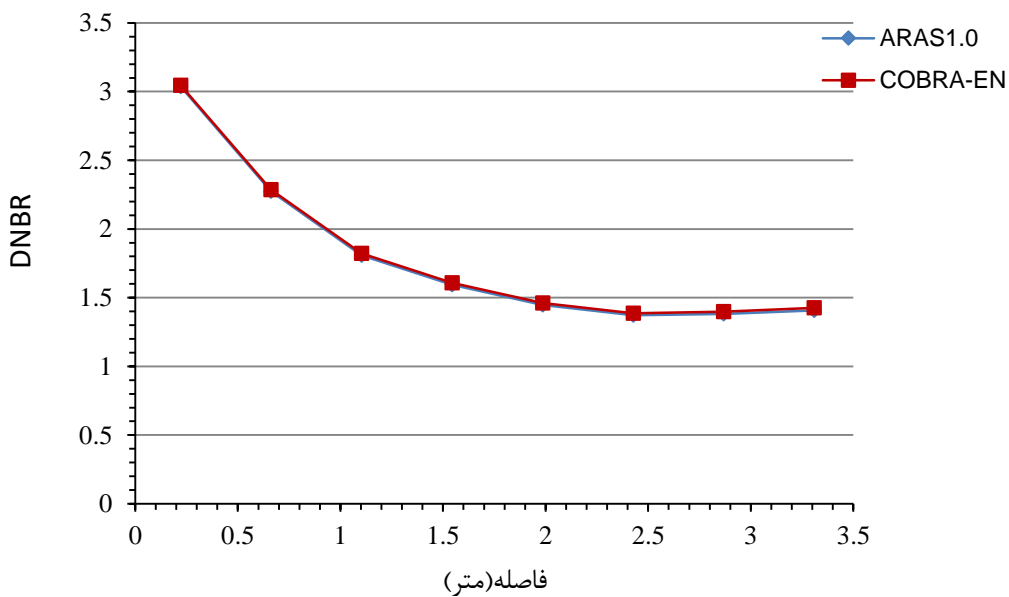


شکل ۱۶: توزیع محوری کیفیت غیر تعادلی بخار برای کانال شماره ۱ (کانال داغ)

با توجه به نتایج ارائه شده در این قسمت، در کانال شماره ۱ با توجه به بیشتر بودن توان میله‌های متناظر با آن، جریان دوفازی تشکیل شده است. در مقایسه با کد COBRA-EN شروع جوشش در این مسئله به درستی تخمین زده شده است. لازم به ذکر است که در کد COBRA-EN، حد بالایی برابر ۱۰ برای DNBR در نظر گرفته شده که با رسیدن به آن، مقدار صفر در خروجی کد چاپ می‌شود.

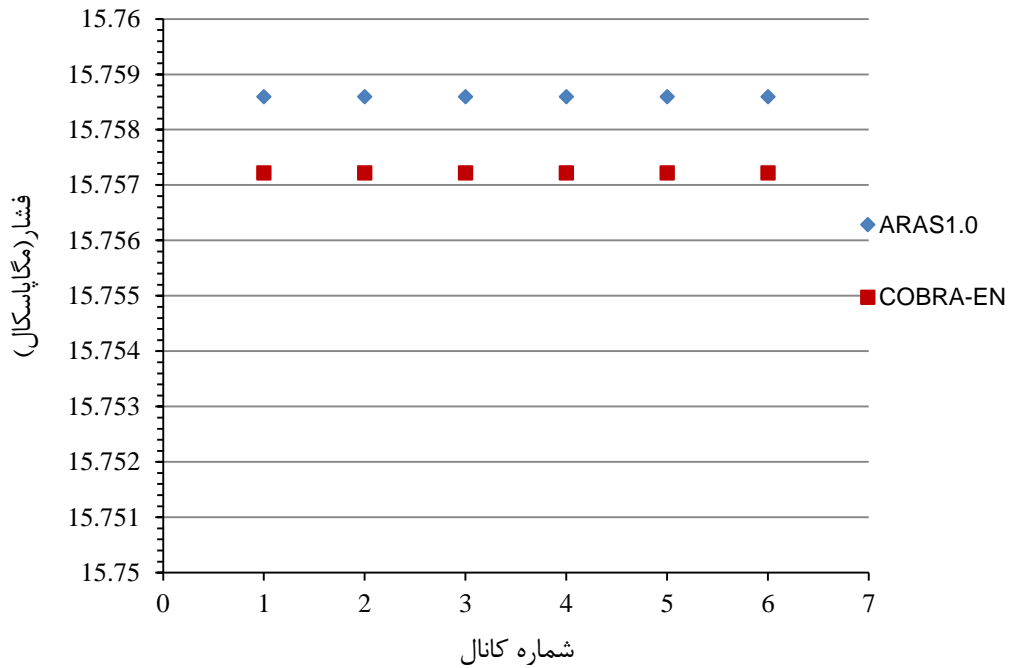


شکل ۱۷: توزیع محوری شار حرارتی بحرانی برای کانال شماره ۱ (کانال داغ)

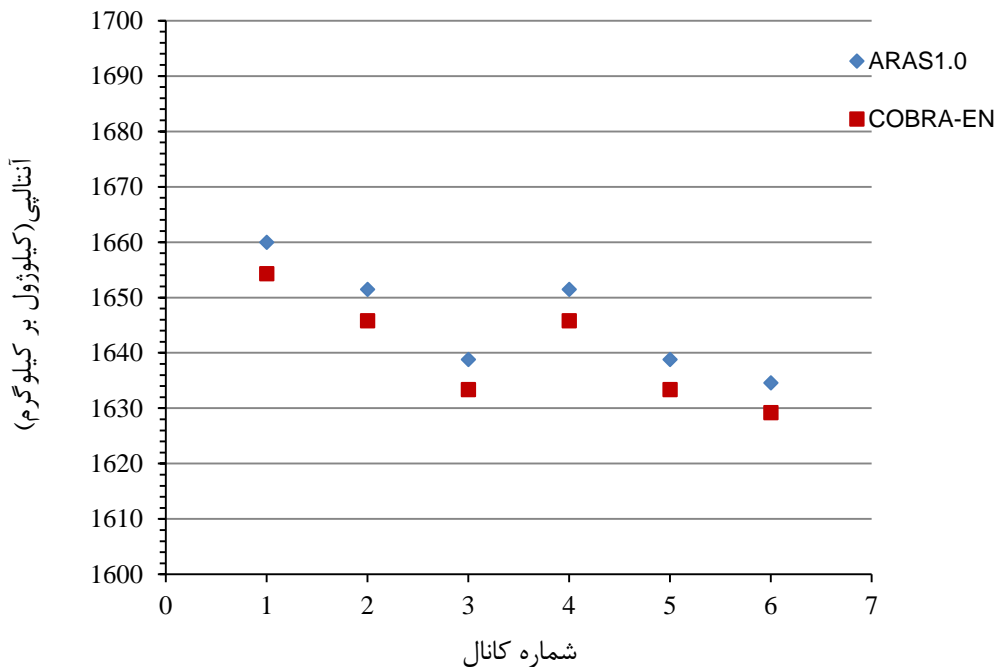


شکل ۱۸: توزیع محوری DNBR برای میله داغ

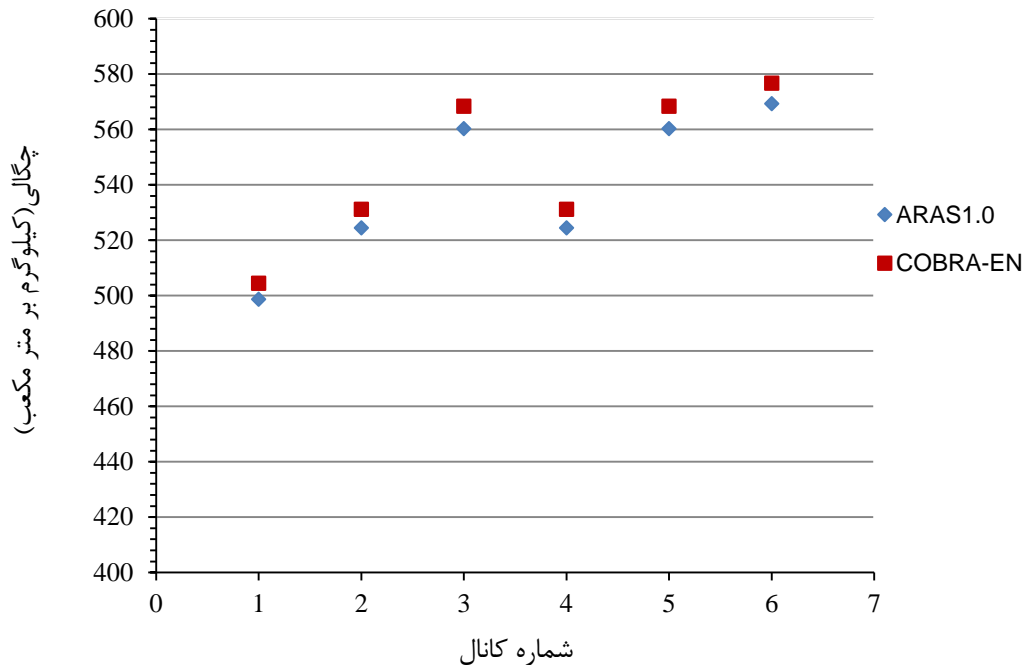
پس از ارائه و مقایسه نتایج به دست آمده برای سیال و اطمینان از صحت آن، برخی از مهمترین پارامترهای سیال برای کانال‌های مختلف در شکل‌های ۱۹ تا ۲۳ نمایش داده شده است.



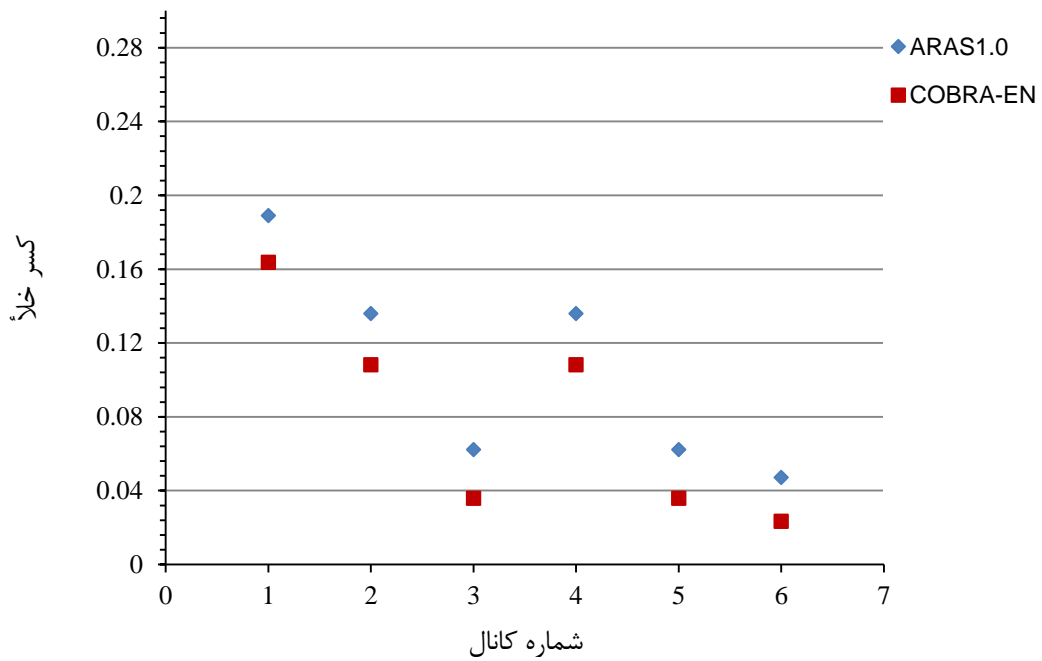
شکل ۱۹: فشار سیال در ورودی کانال‌ها



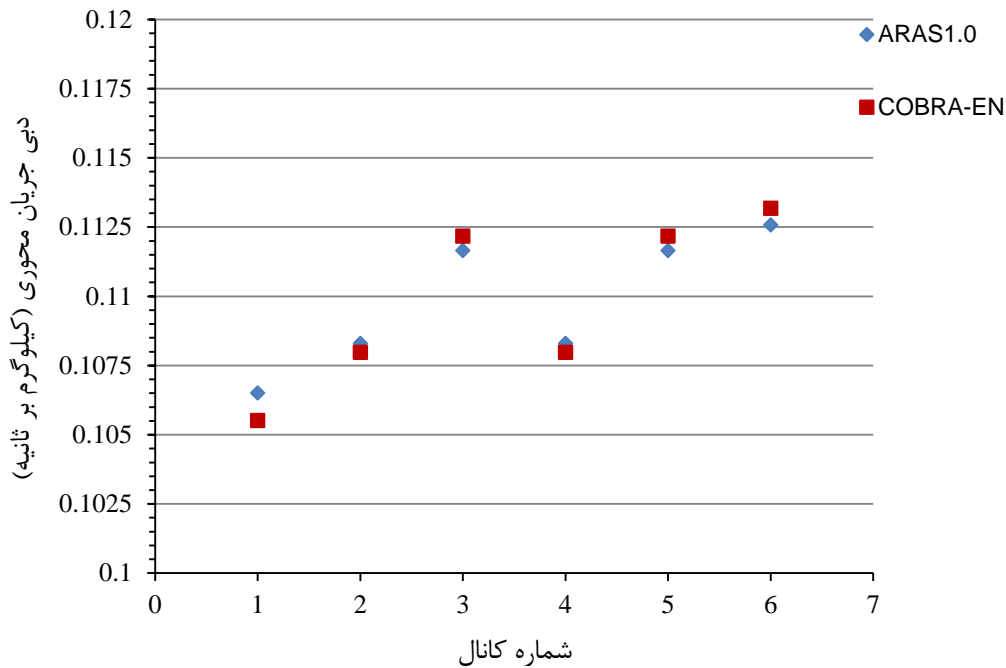
شکل ۲۰: آنتالپی سیال در خروجی کانال‌ها



شکل ۲۱: چگالی سیال در خروجی کانال‌ها

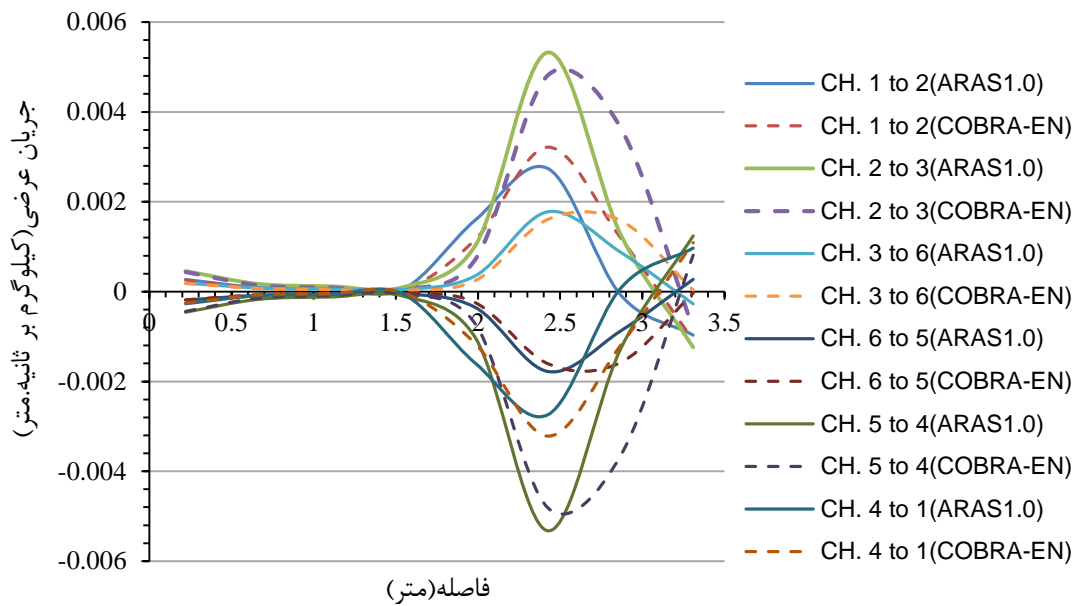


شکل ۲۲: کسر خلأ در خروجی کانال‌ها



شکل ۲۳: دبی جریان محوری در خروجی کانال‌ها

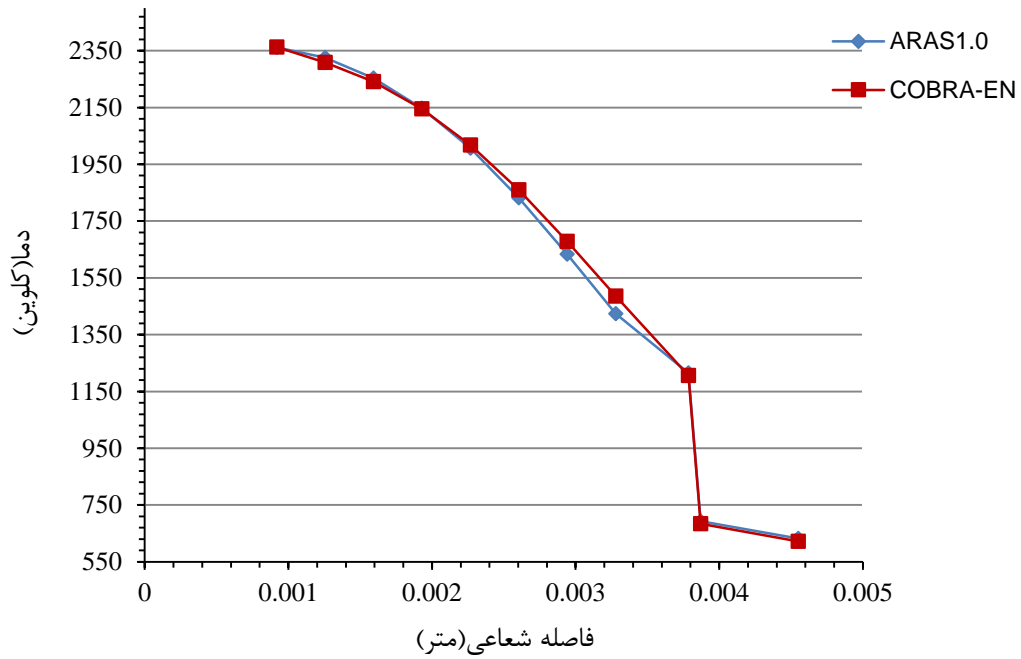
یکی از مهم‌ترین پارامترهای مورد بررسی در محاسبات زیرکانال، تخمین میزان دبی جریان انتقال یافته میان کانال‌های مرتبط با یکدیگر است. یکی از عواملی که منجر به ایجاد چنین جریانی می‌شود، اختلاف فشار میان دو کانال در اثر اختلاف در انرژی تولید شده در یک کانال نسبت به کانال‌های مجاورش است. این انتقال جریان به گونه‌ای صورت می‌گیرد که نهایتاً افت فشار تمام کانال‌ها یکسان گردد و اختلاف فشار میان کانال‌های مجاور در یک مقطع طولی به صفر برسد. برای بررسی نحوه انتقال جریان میان کانال‌ها در این بخش جریان عرضی میان کانال‌های مختلف نشان داده شده است (شکل ۲۴).



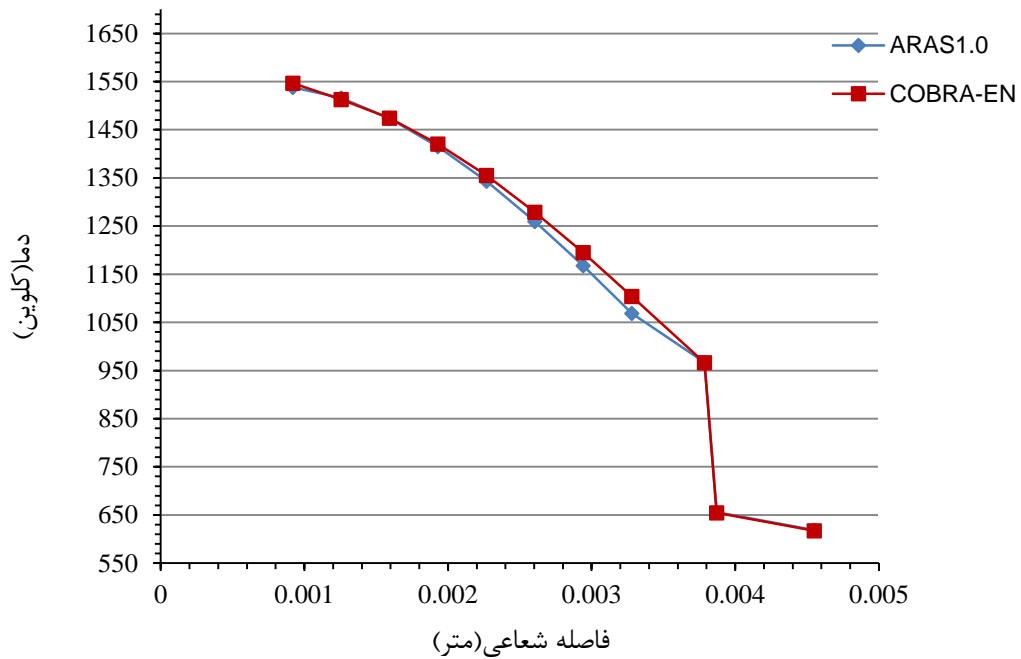
شکل ۲۴: توزیع جریان عرضی میان کانال‌های مجاور

با مقایسه نتایج در این شکل و نتایج ارائه شده در شکل ۲۳ برای دبی جریان می‌توان دریافت که تغییرات دبی جریان محوری برای هر کانال در خروجی به خوبی نحوه پر و خالی شدن هر کانال را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج ارائه شده در شکل‌های اخیر می‌توان تطابق خوب میان نتایج به دست آمده از دو کد را ملاحظه نمود.

در ادامه به منظور تکمیل نتایج برای مسئله مورد نظر، توزیع شعاعی دما برای دو میله سوخت داغ و متوسط در شکل ۲۵ و ۲۶ نشان داده شده است. برای به دست آوردن این نتایج، با توجه به توخالی بودن میله‌های سوخت در این مسئله، از نسخه تصحیح شده کد COBRA-EN استفاده شده است. در این نسخه، زیرروال TEMP که وظیفه محاسبه توزیع دمایی در سوخت را دارد به گونه‌ای اصلاح گردیده است که قطر داخلی میله سوخت را مخالف صفر در نظر بگیرد. منظور از بیشینه دما در این نمودارها، فاصله محوری است که دمای مرکز سوخت در آن بیشترین مقدار را دارد.



شکل ۲۵: توزیع شعاعی بیشینه دمای سوخت برای میله داغ



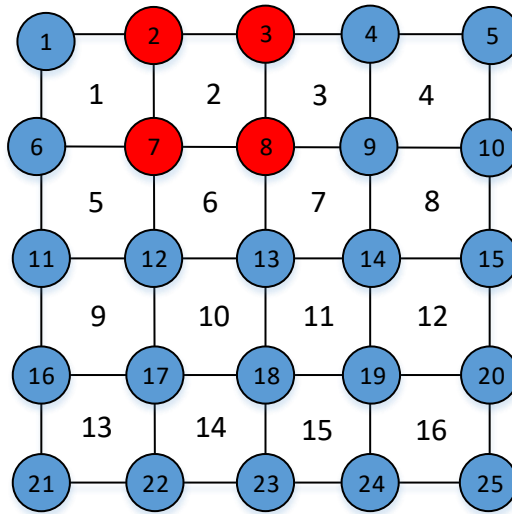
شکل ۲۶: توزیع شعاعی بیشینه دمای سوخت برای میله با توان متوسط

۱۱-۲- مسئله شماره ۲

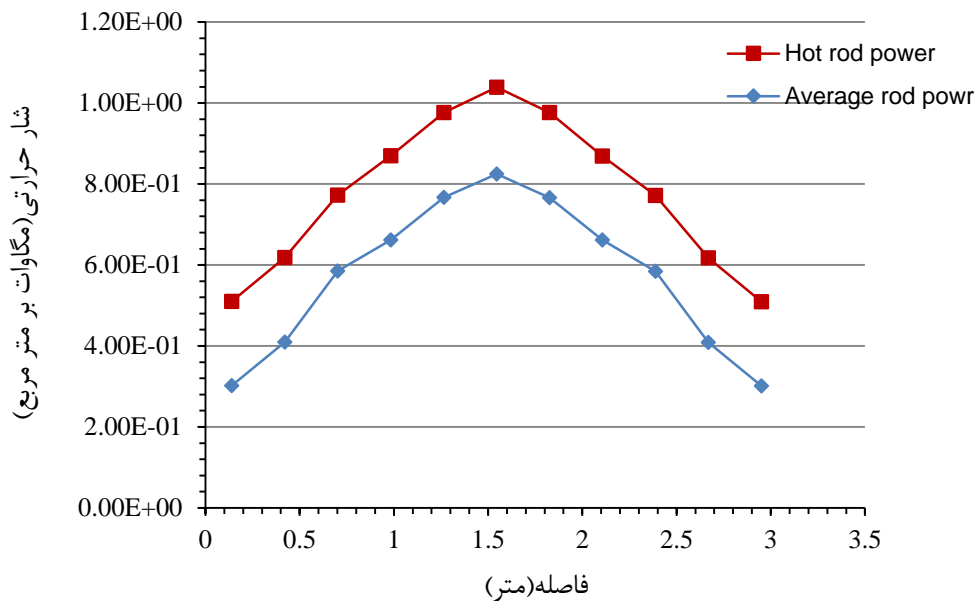
در مسئله نمونه دوم، آرایه‌ای از ۲۵ میله سوخت به صورت چهار وجهی در نظر گرفته شده است که نمایش ساده‌ای از آن در شکل ۲۷ نشان داده شده است که تعداد کانال‌ها در این مسئله برابر ۱۶ می‌باشد. مانند مسئله قبل، برای این سیستم فرض می‌گردد مشخصات ارائه شده در جدول شماره (۳) برقرار باشد (داده‌های ارائه شده تقریباً مشابه مقادیر یک راکتور آب سبک تحت فشار نوع غربی است). در این حالت فرض می‌شود که توزیع توان محوری به صورت توزیع متقارن بوده و برای دو فاز شدن جریان حداقل در یکی از کانال‌ها، توان میله‌های متناظر با کانال ۲ بیشتر از سایر میله‌ها باشد. این توزیع شار حرارتی برای میله‌های با توان بیشینه (شماره‌های ۲ و ۳ و ۷ و ۸) و میله‌های با توان متوسط (سایر میله‌ها) در شکل ۲۸ نشان داده شده است.

جدول شماره ۳: مشخصات مسئله شماره ۲

شماره	پارامتر	مقدار
۱	دبی جرمی ورودی به هر کانال (کیلوگرم بر ثانیه)	۰/۲۱۹۹
۲	دمای ورودی (کلوین)	۵۶۸
۳	فشار خروجی (مگاپاسکال)	۱۵/۵
۴	تعداد تقسیمات محوری	۱۱
۵	تعداد تقسیمات شعاعی سوخت	۹
۶	قطر داخلی سوخت (متر)	۰/۰
۷	قطر خارجی سوخت (متر)	۰/۰۰۹۳۱۹
۸	ضخامت گپ (متر)	۰/۰۰۰۰۸۳۵
۹	قطر خارجی غلاف (متر)	۰/۰۱۰۷۲
۱۰	چگالی سوخت (کیلوگرم بر متر مکعب)	۱۰۵۵۰
۱۱	چگالی غلاف (کیلوگرم بر متر مکعب)	۶۵۵۰
۱۲	ضریب انتقال حرارت گپ (وات بر متر مربع. کلوین)	۳۳۰۰
۱۳	مساحت کانال (متر مربع)	۰/۰۰۰۱۰۹۹۶۵
۱۴	محیط گرم شونده (متر)	۰/۰۳۳۶۷۷۸
۱۵	اندازه گام (متر)	۰/۰۱۴۱۵
۱۶	طول میله سوخت (متر)	۳/۰۹

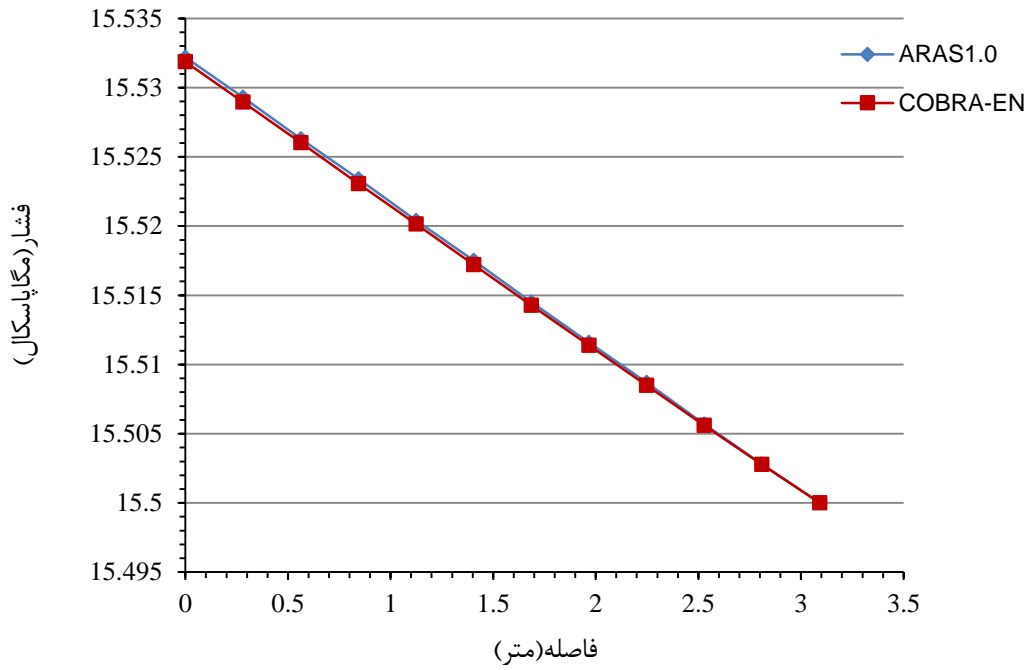


شکل ۲۷: آرایش ۲۵ میله سوخت در آرایش چهار وجهی

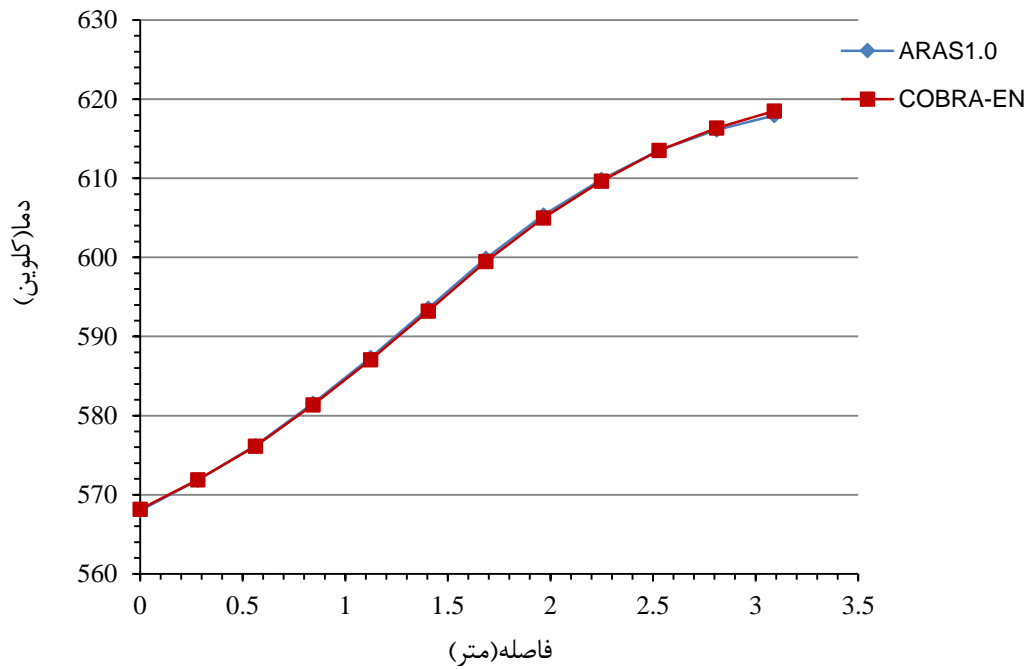


شکل ۲۸: توزیع محوری شار حرارتی در میله‌های داغ و میله با توان متوسط

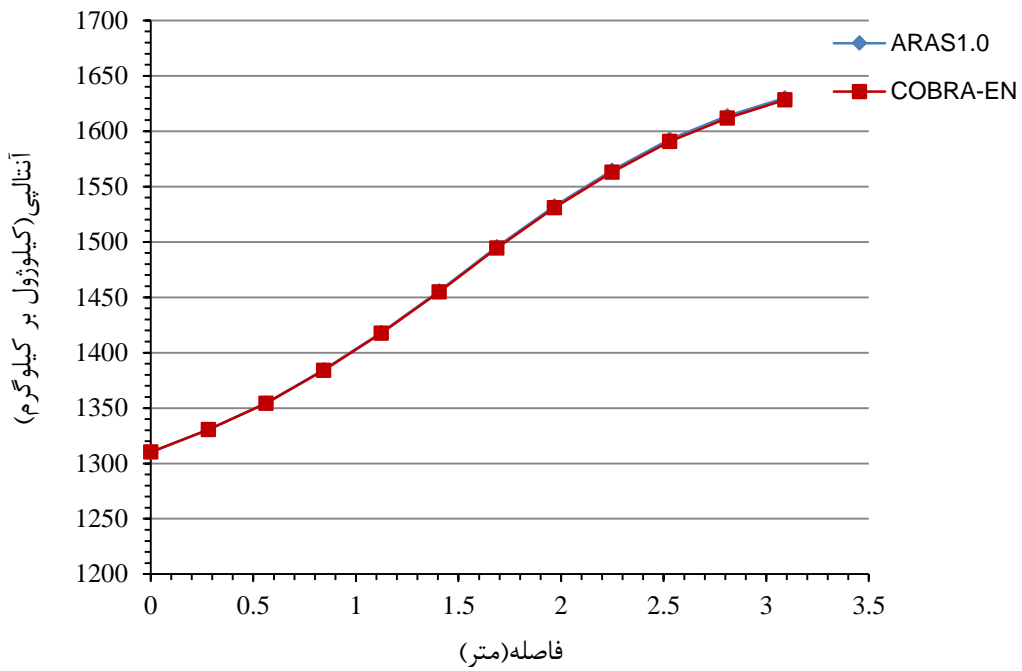
برای مسئله مورد نظر، نتایج پارامترهای سیال در شکل ۲۹ تا شکل ۳۶ به همراه نتایج حاصل از کد COBRA-EN ارائه شده است.



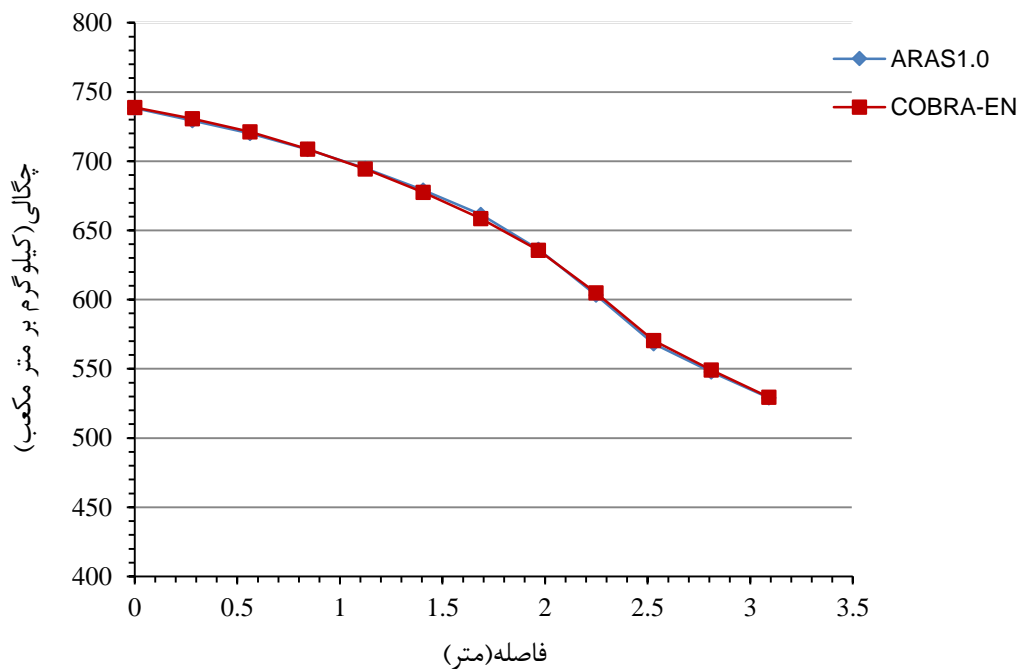
شکل ۲۹: توزیع محوری فشار برای کانال شماره ۲ (کانال داغ)



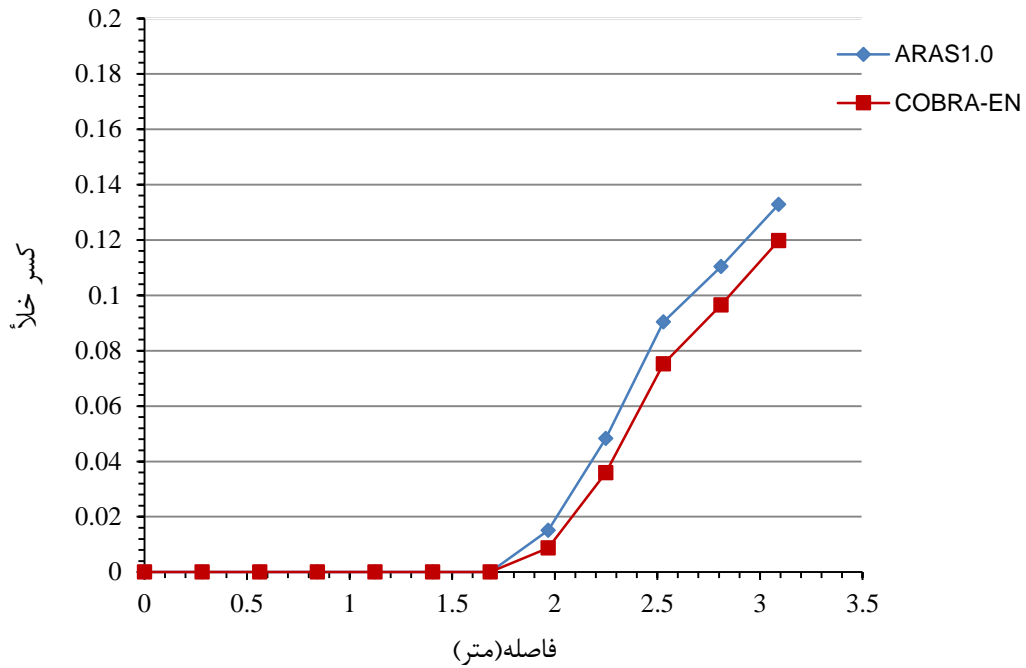
شکل ۳۰: توزیع محوری دمای سیال برای کانال شماره ۲ (کانال داغ)



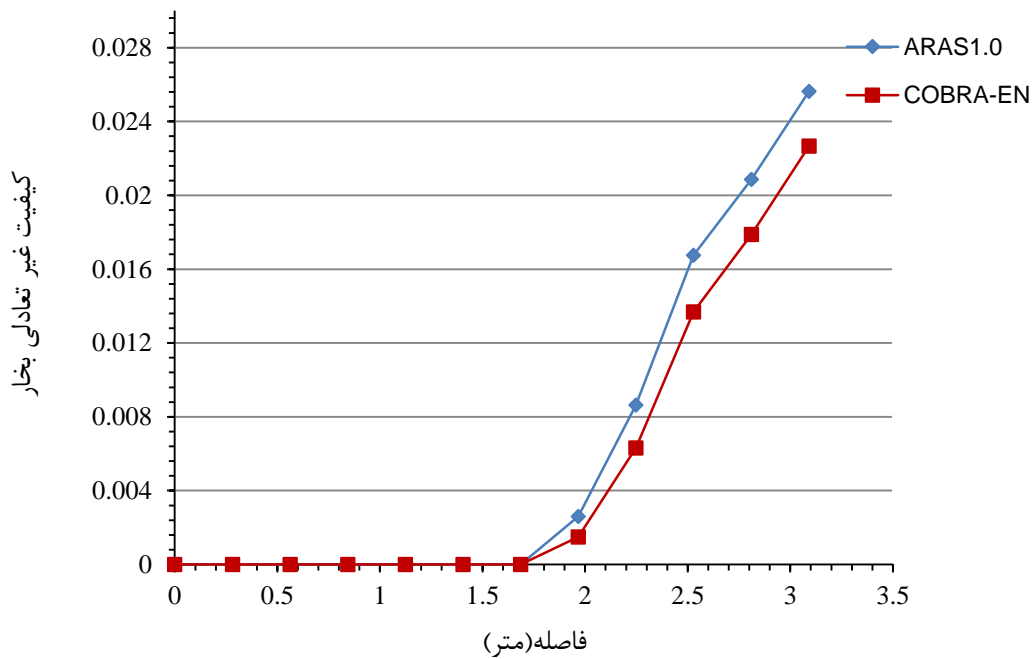
شکل ۳۱: توزیع محوری آنتالیسی سیال برای کانال شماره ۲ (کانال داغ)



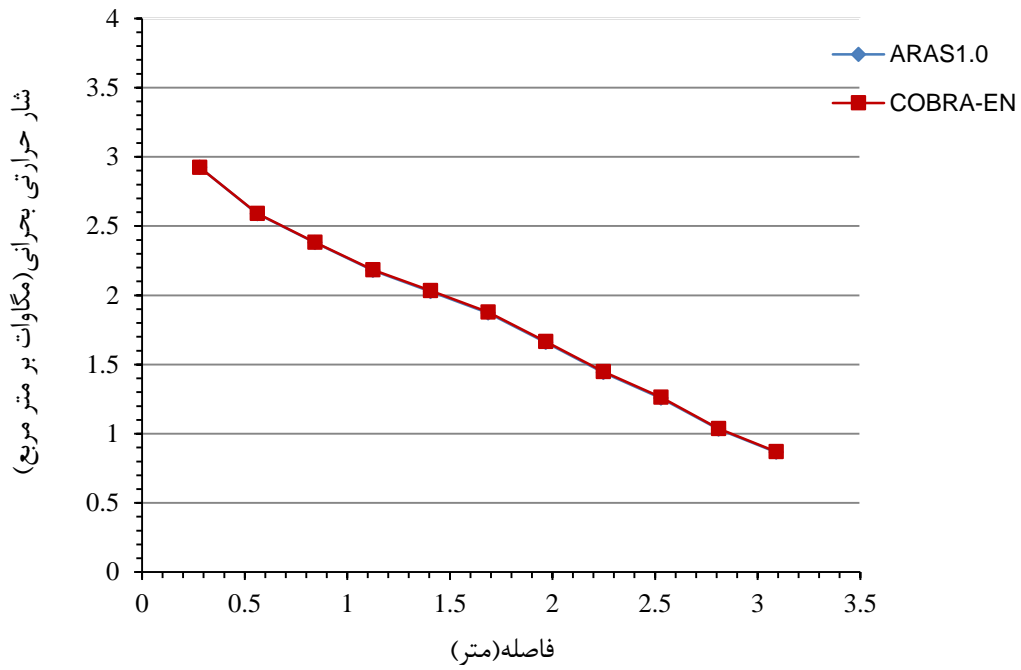
شکل ۳۲: توزیع محوری چگالی سیال برای کانال شماره ۲ (کانال داغ)



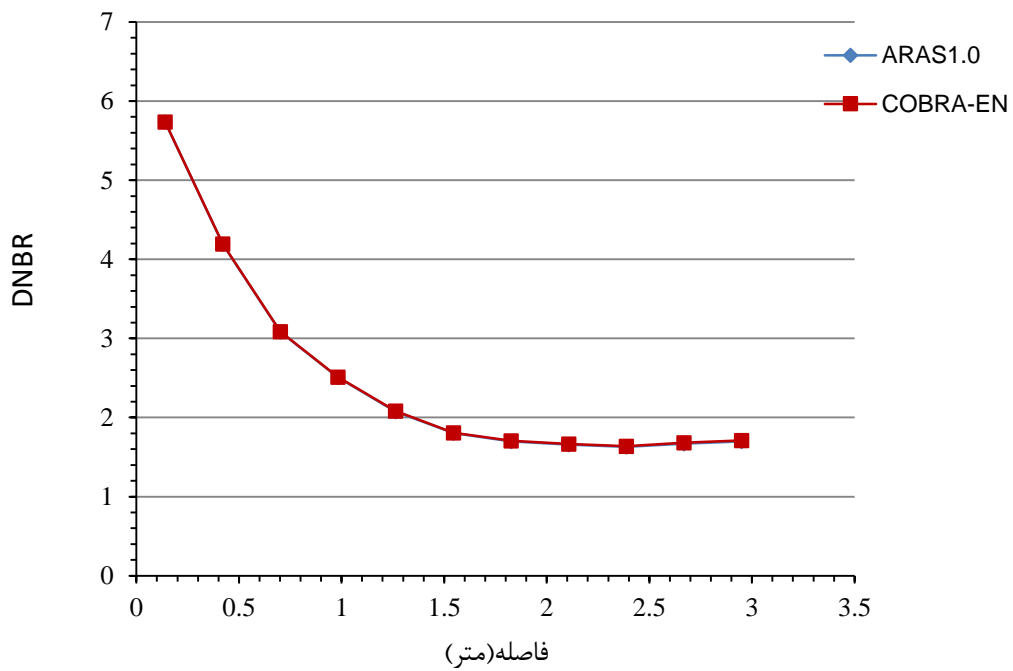
شکل ۳۳: توزیع محوری کسر خلأ برای کانال شماره ۲ (کانال داغ)



شکل ۳۴: توزیع محوری کیفیت غیر تعادلی بخار برای کانال شماره ۲ (کانال داغ)

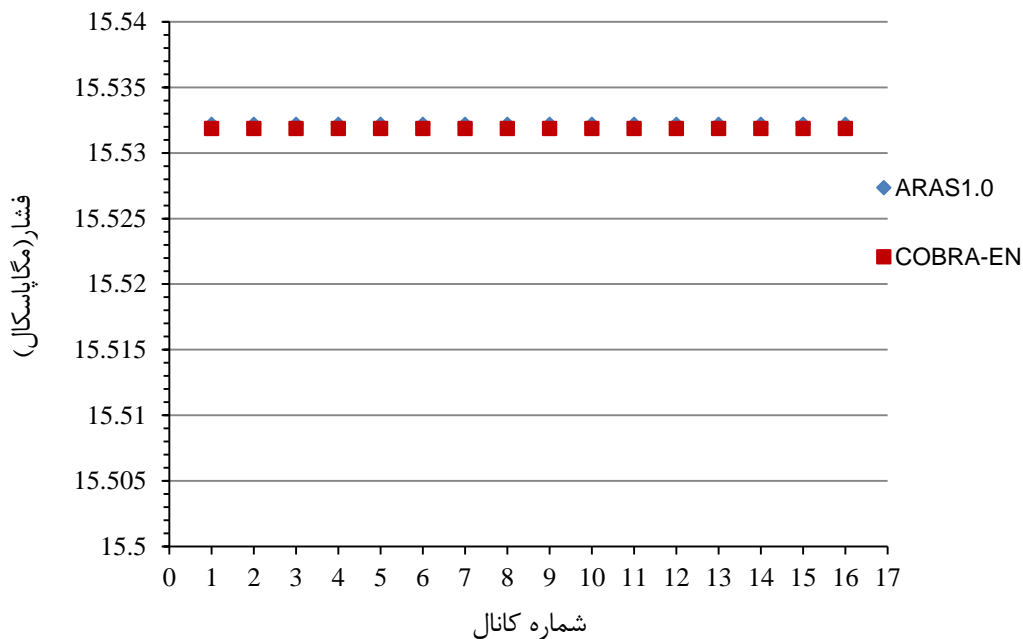


شکل ۳۵: توزیع محوری شار حرارتی بحرانی برای کانال شماره ۲ (کانال داغ)

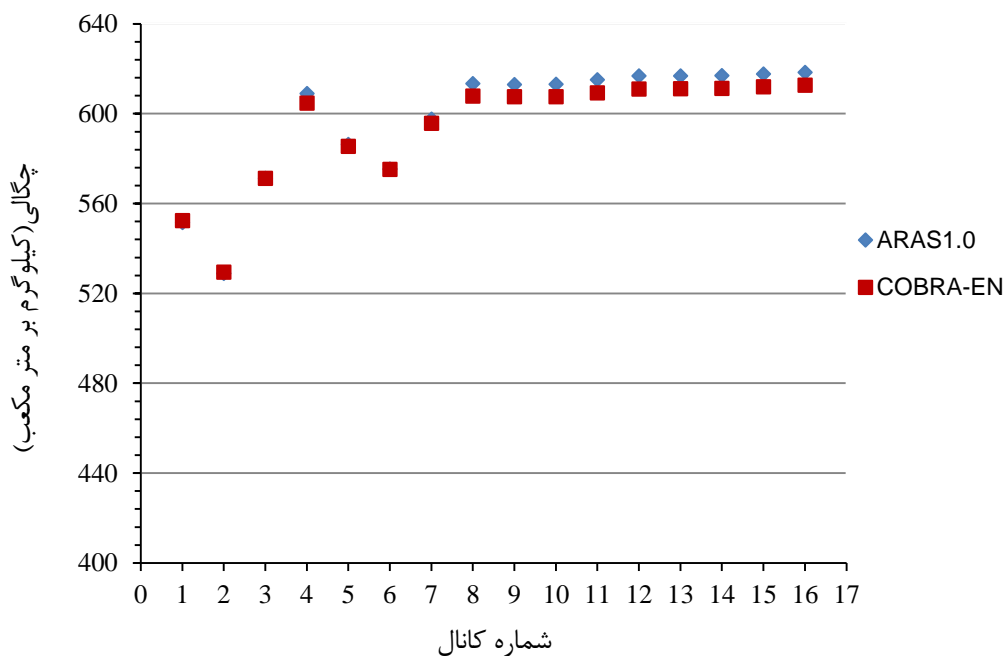


شکل ۳۶: توزیع محوری DNBR برای میله داغ

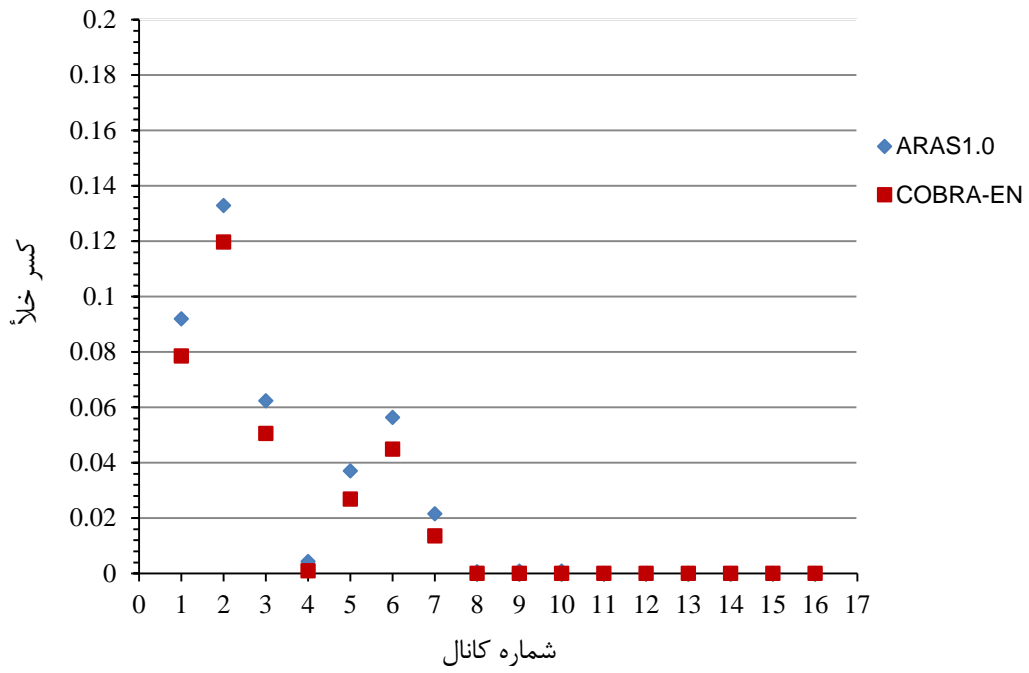
با توجه به نتایج ارائه شده ملاحظه می‌شود که برای آرایش چهار وجهی نیز تطبیق خوبی میان نتایج به دست آمده برای سیال وجود دارد. لازم به ذکر است نتایج به دست آمده بر اساس نسبت لغزش یک و استفاده از مدل همگن است. همچنین در شکل ۳۷ تا ۴۰ نتایج پارامترهای سیال برای کانال‌های مختلف ترسیم گردیده است.



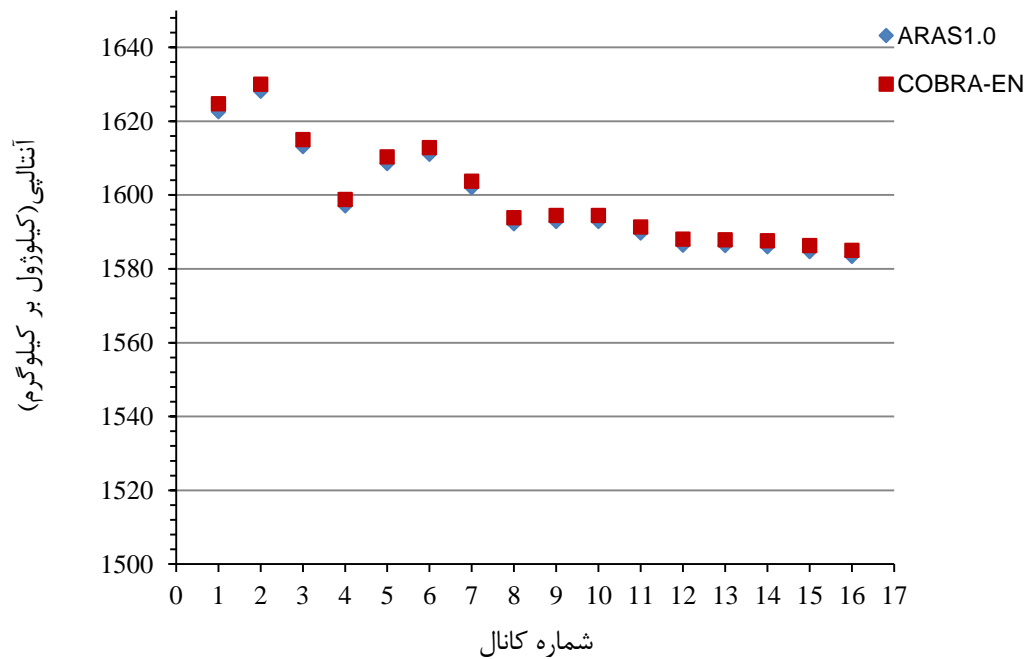
شکل ۳۷: فشار در ورودی کانال‌ها



شکل ۳۸: چگالی سیال در خروجی کانال‌ها

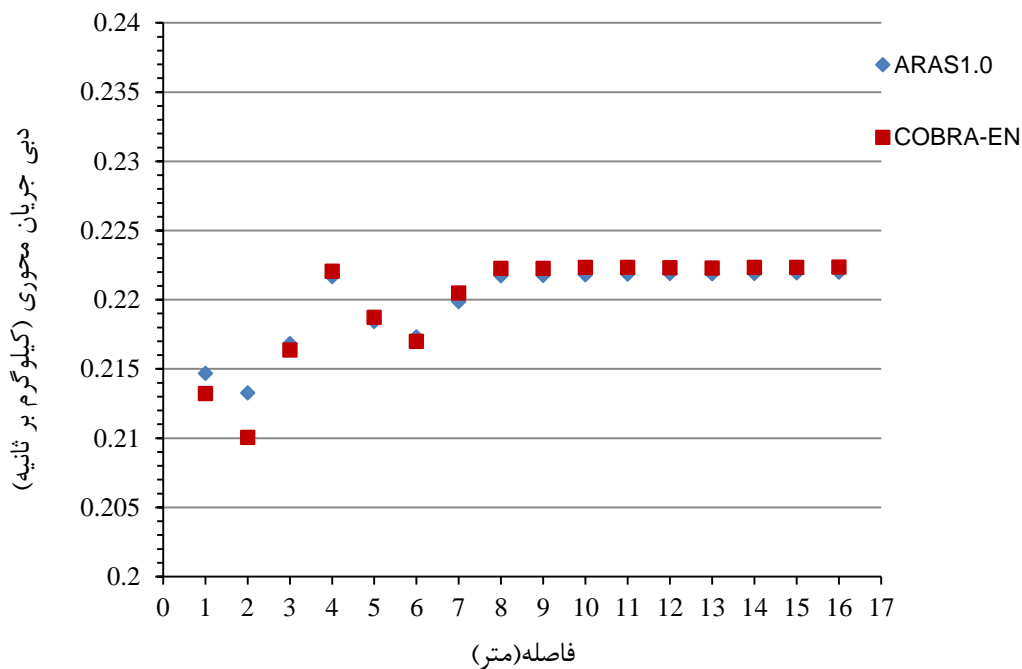


شکل ۳۹: کسر خلأ در خروجی کانال‌ها

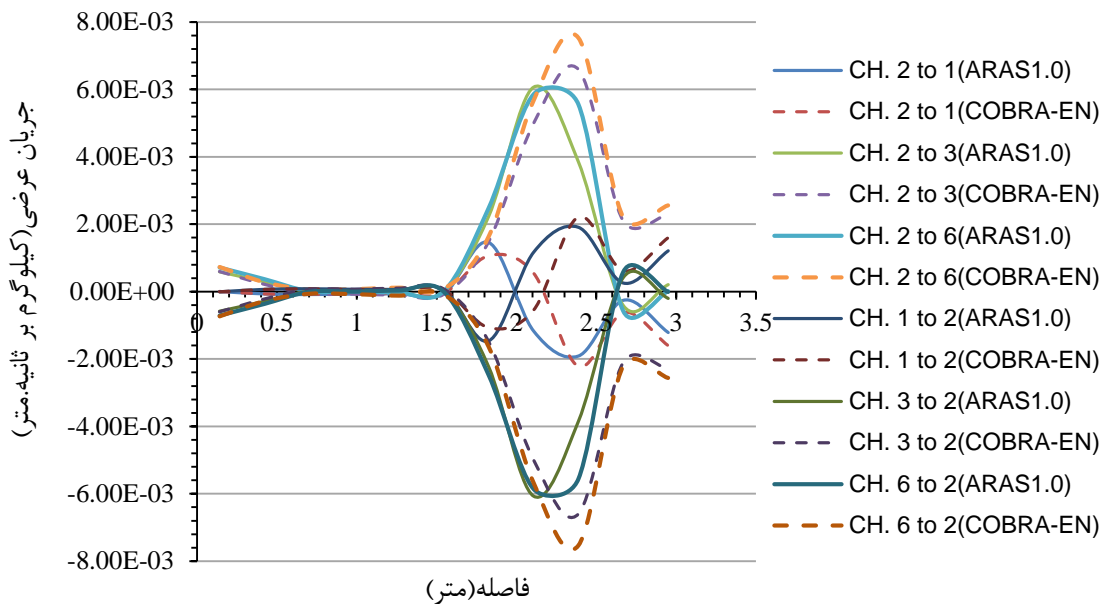


شکل ۴۰: آنتالپی سیال در خروجی کانال‌ها

در این قسمت به منظور بررسی تبادل جریان میان کانال‌های مسئله ارائه شده، نتایج توزیع جریان عرضی برای کانال شماره ۲ و کانال‌های همسایه آن یعنی کانال‌های ۳، ۱ و ۶ به همراه نتایج دبی خروجی از هر کانال در شکل ۴۱ و ۴۲ نشان داده شده است. بر اساس نتایج به دست آمده، ملاحظه می‌گردد که جریان عرضی میان دو کانال متناظر برابر و در خلاف جهت یکدیگر است. همچنین همانگونه که مشاهده می‌شود، پر و خالی شدن کانال‌ها به درستی تخمین زده شده است.

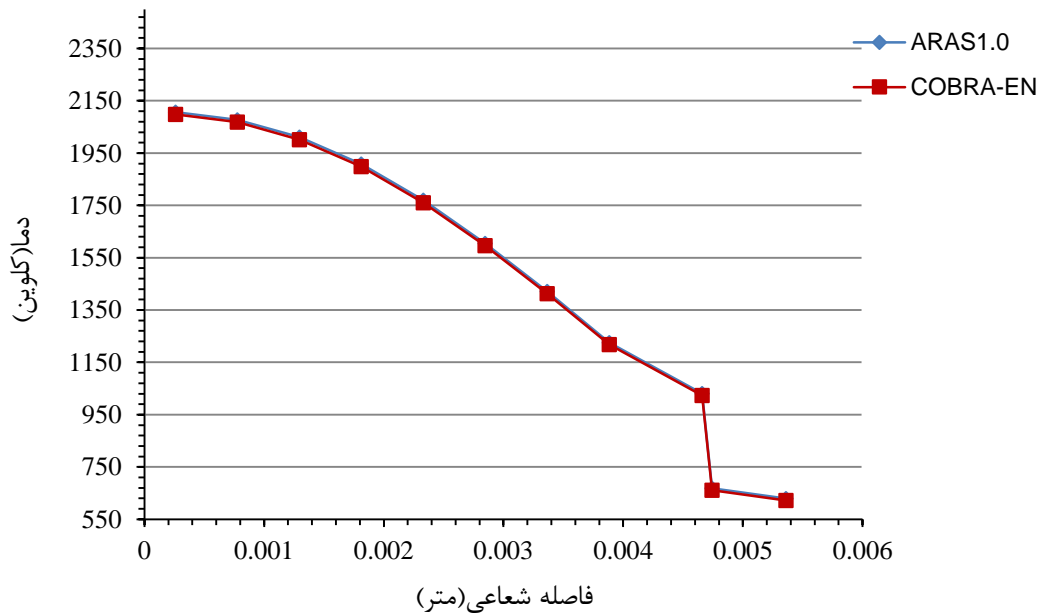


شکل ۴۱: دبی جریان محوری در خروجی کانال‌ها

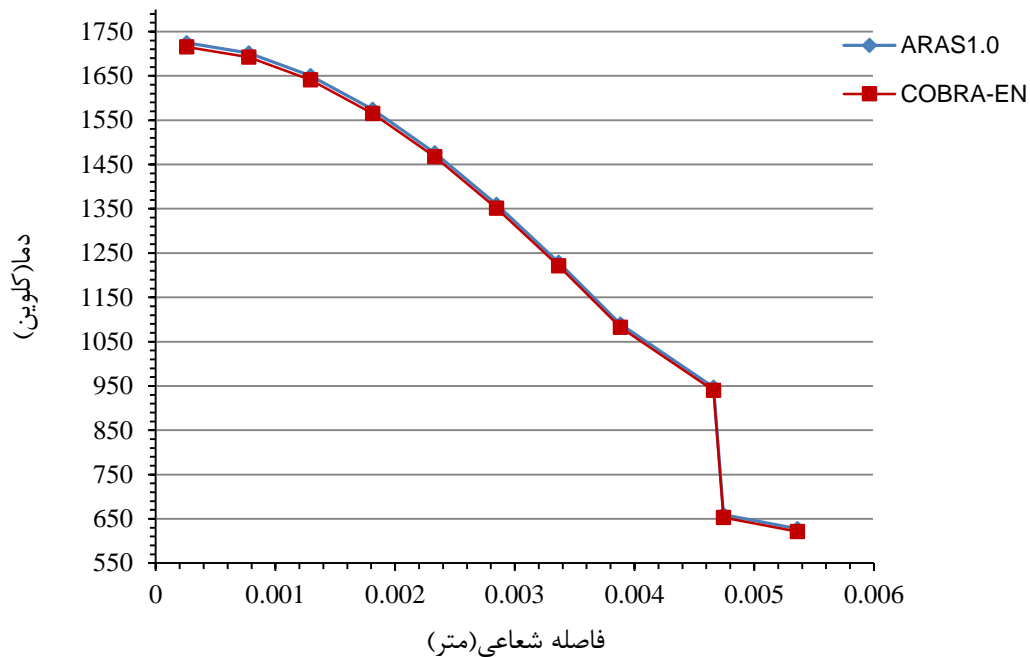


شکل ۴۲: توزیع دبی جریان عرضی میان کانال شماره ۲ و کانال‌های همسایه آن

در انتها نتایج حاصل از محاسبات توزیع شعاعی دمای میله سوخت برای دو میله داغ و متوسط در شکل ۴۳ و ۴۴ رسم گردیده است. در این مسئله قطر داخلی سوخت صفر بوده و سوخت توپر فرض می‌گردد.



شکل ۴۳: توزیع شعاعی بیشینه دمای سوخت برای میله داغ



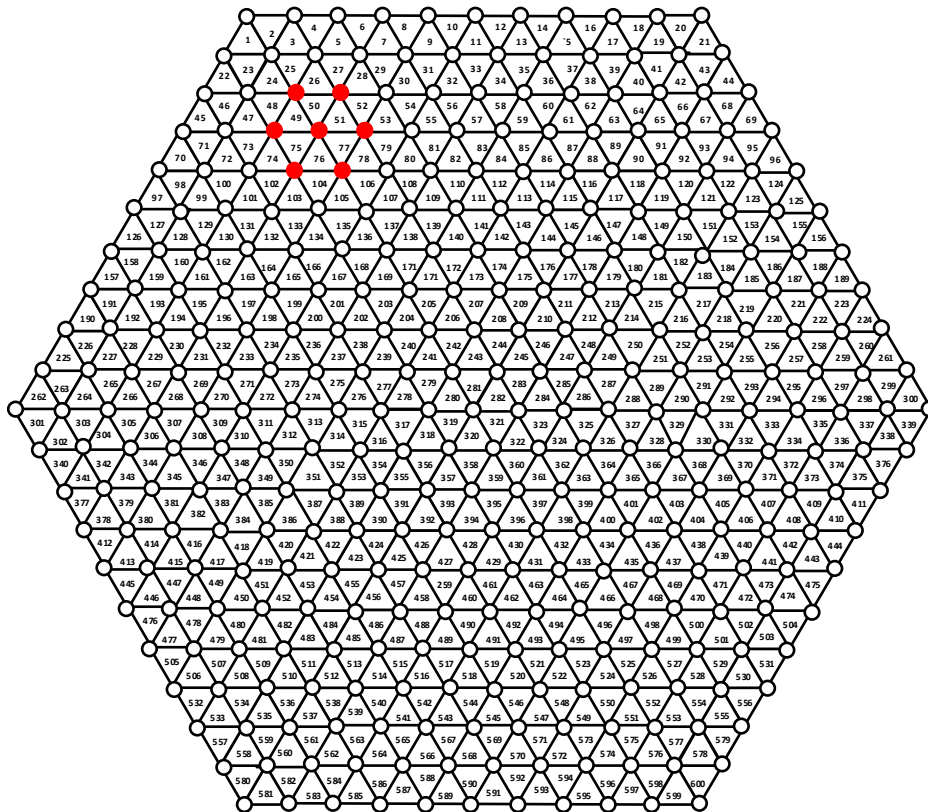
شکل ۴۴: توزیع شعاعی بیشینه دمای سوخت برای میله با توان متوسط

۱۱-۳- مسئله شماره ۳

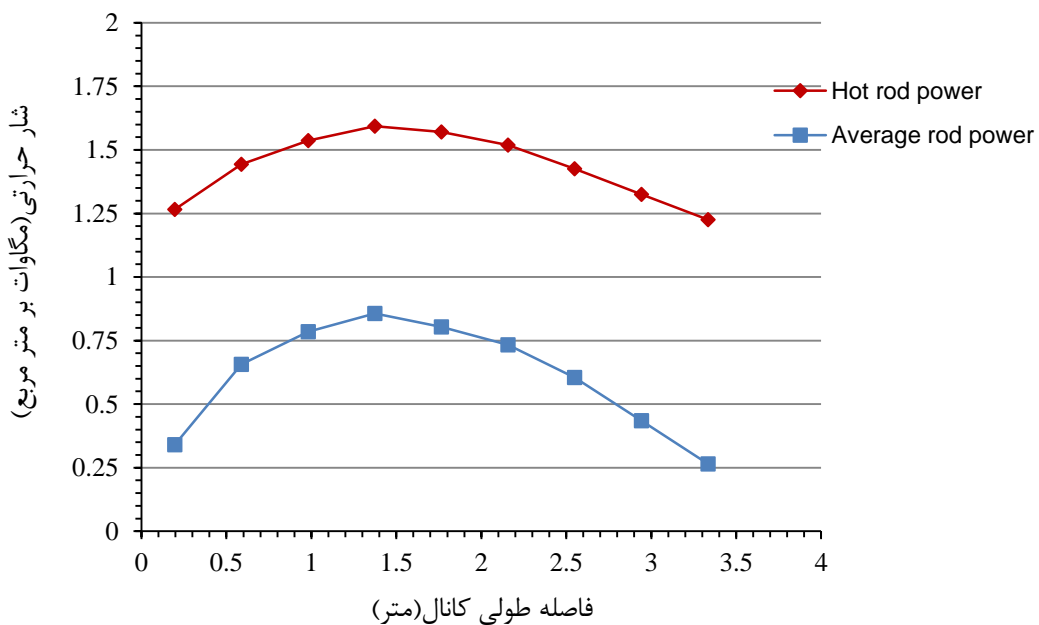
در مسئله نمونه سوم، جهت بررسی روند حل توسعه داده شده، یک مجتمع سوخت شش وجهی با ۶۰۰ کانال و ۳۳۱ میله سوخت مطابق شکل ۴۵ در نظر گرفته شده است. مشخصات مسئله مطابق با داده‌های ارائه شده در جدول شماره (۴) می‌باشد که شباهت زیادی با مشخصات یک مجتمع سوخت راکتور بوشهر دارد. در این مسئله نیز همانند مثال‌های پیشین، توان حرارتی در برخی از میله‌های سوخت به گونه‌ای تغییر داده شده است تا جریان در بخشی از سیستم دوفازی گردد. این توزیع توان در شکل ۴۶ نشان داده شده است. برای این مسئله فرض می‌شود که توان ۷ میله سوختی که با رنگ قرمز در شکل نشان داده شده است، بیشتر از توان سایر میله‌ها باشد. علاوه بر این در این مثال تعداد ۹ نگهدارنده سوخت در طول میله‌های سوخت در نظر گرفته شده است.

جدول شماره ۴: مشخصات مسئله شماره ۳

شماره	پارامتر	مقدار
۱	دبی جرمی ورودی هر کانال (کیلوگرم بر ثانیه)	۰/۱۴۰۱۳
۲	دمای ورودی (کلوین)	۵۶۴
۳	فشار خروجی (مگاپاسکال)	۱۵/۷
۴	تعداد تقسیمات محوری	۹
۵	تعداد تقسیمات شعاعی سوخت	۹
۶	قطر داخلی سوخت (متر)	۰/۰۰۱۵
۷	قطر خارجی سوخت (متر)	۰/۰۰۷۵۷
۸	ضخامت گپ (متر)	۰/۰۰۰۰۸۵
۹	قطر خارجی غلاف (متر)	۰/۰۰۹۱
۱۰	چگالی سوخت (کیلوگرم بر متر مکعب)	۱۰۵۵۰
۱۱	چگالی غلاف (کیلوگرم بر متر مکعب)	۶۵۵۰
۱۲	ضریب انتقال حرارت گپ (وات بر متر مربع. کلوین)	۳۳۰۰
۱۳	مساحت کانال (متر مربع)	۰/۰۰۰۰۳۷۸۷
۱۴	محیط گرم شونده (متر)	۰/۰۱۴۲۹
۱۵	تعداد نگهدارنده سوخت	۹
۱۶	اندازه گام (متر)	۰/۰۱۲۷۵
۱۷	طول میله سوخت (متر)	۳/۵۳

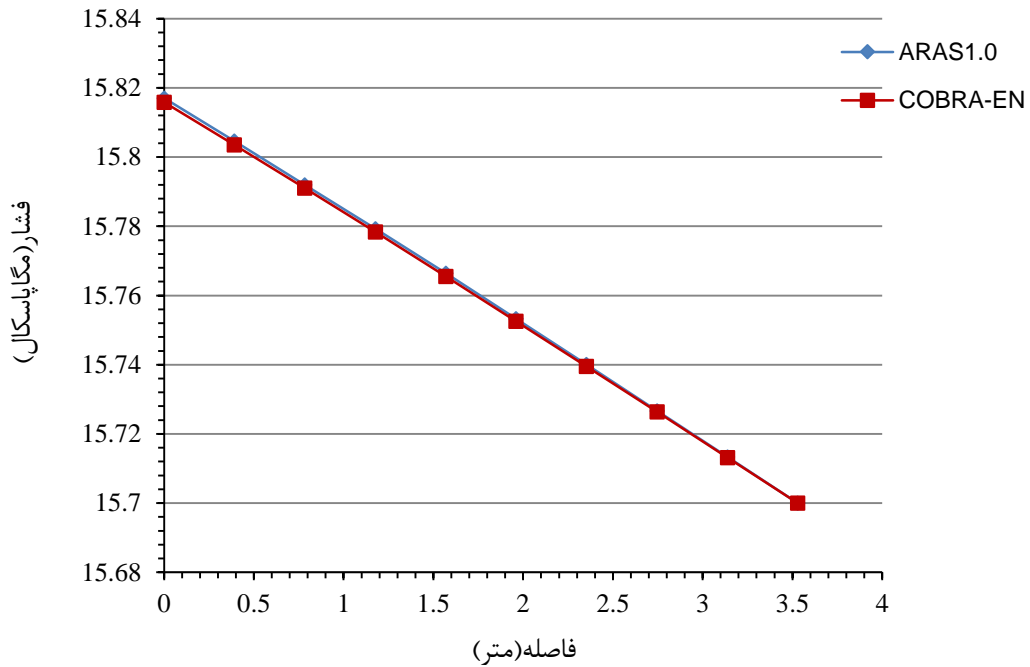


شکل ۴۵: آرایش ۳۳۱ میله سوخت مثلی

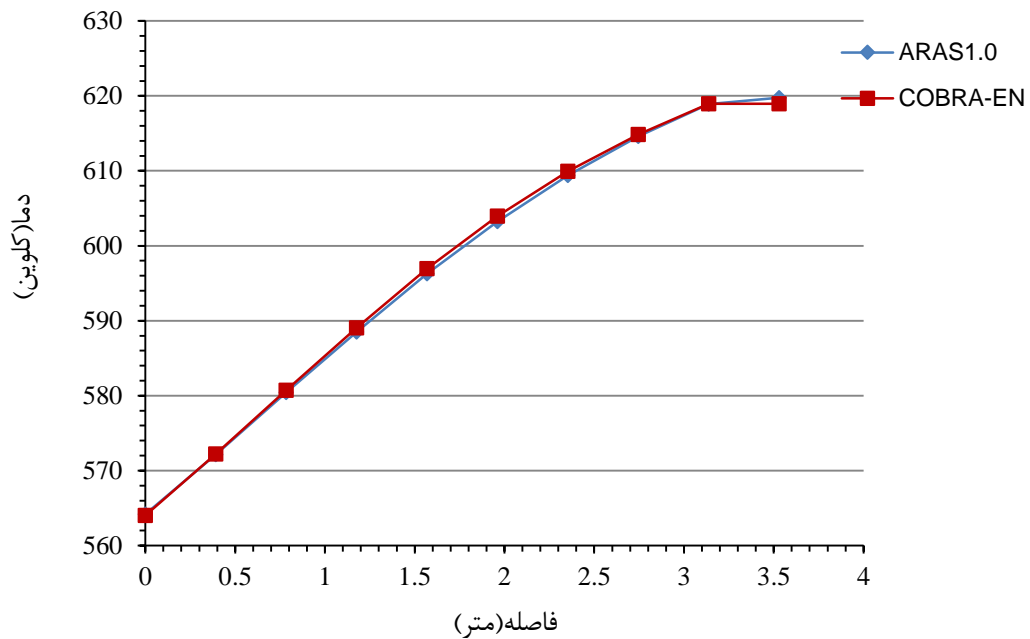


شکل ۴۶: توزیع محوری شار حرارتی برای میله‌های داغ و میله با توان متوسط

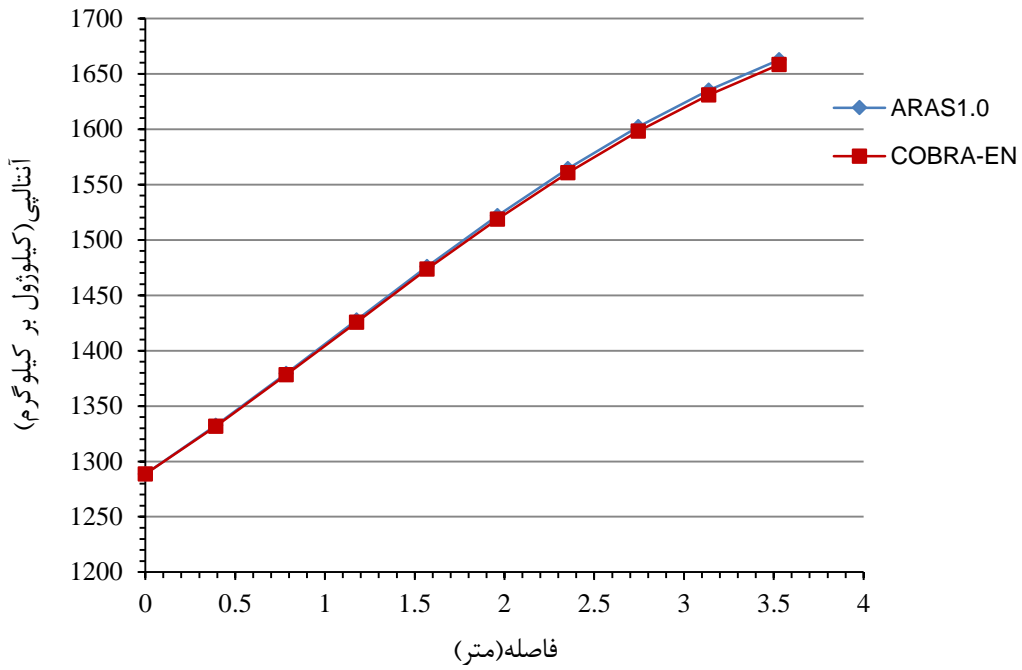
برای سیستم توصیف شده، همانند قبل نتایج توزیع پارامترهای سیال برای کانال داغ در شکل ۴۷ الی شکل ۵۴ با نتایج حاصل از کد COBRA-EN مقایسه گردیده است. در این سیستم با توجه به تقارن، کانال‌های شماره ۴۹،۵۰،۵۱،۷۵،۷۶،۷۷ کانال داغ را تشکیل می‌دهند.



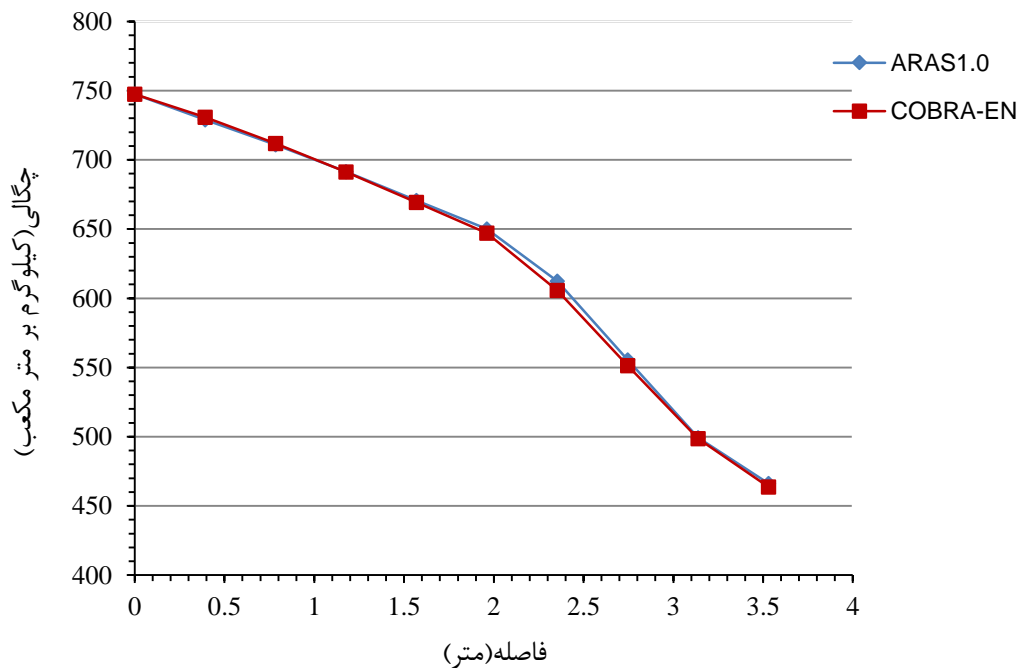
شکل ۴۷: توزیع محوری فشار برای کانال شماره ۵۰ (کانال داغ)



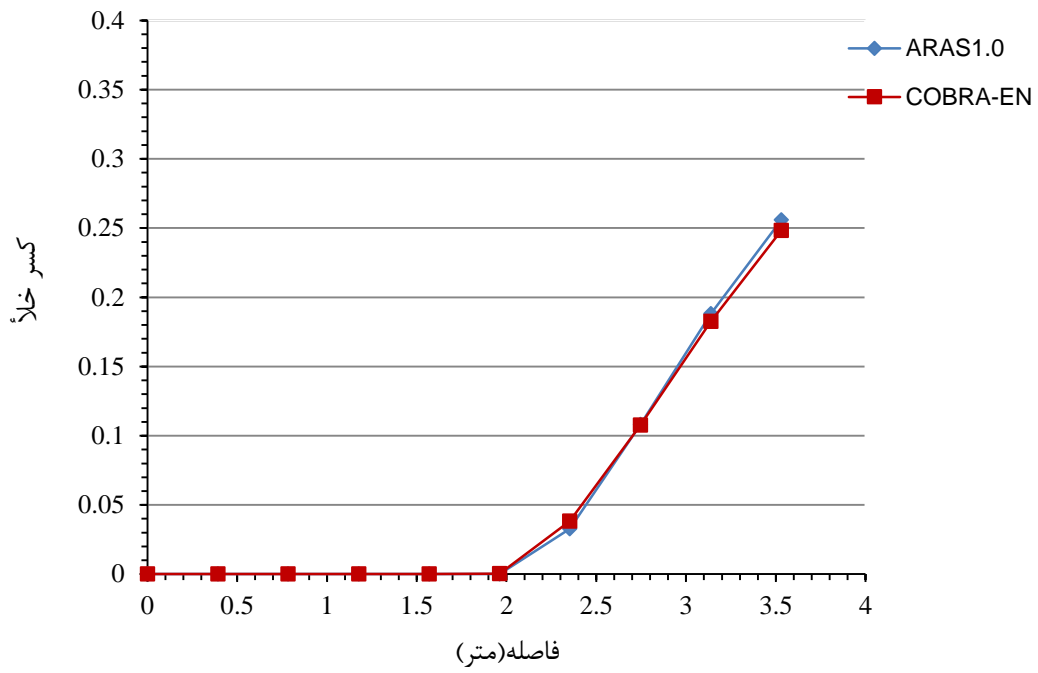
شکل ۴۸: توزیع محوری دمای سیال برای کانال شماره ۵۰ (کانال داغ)



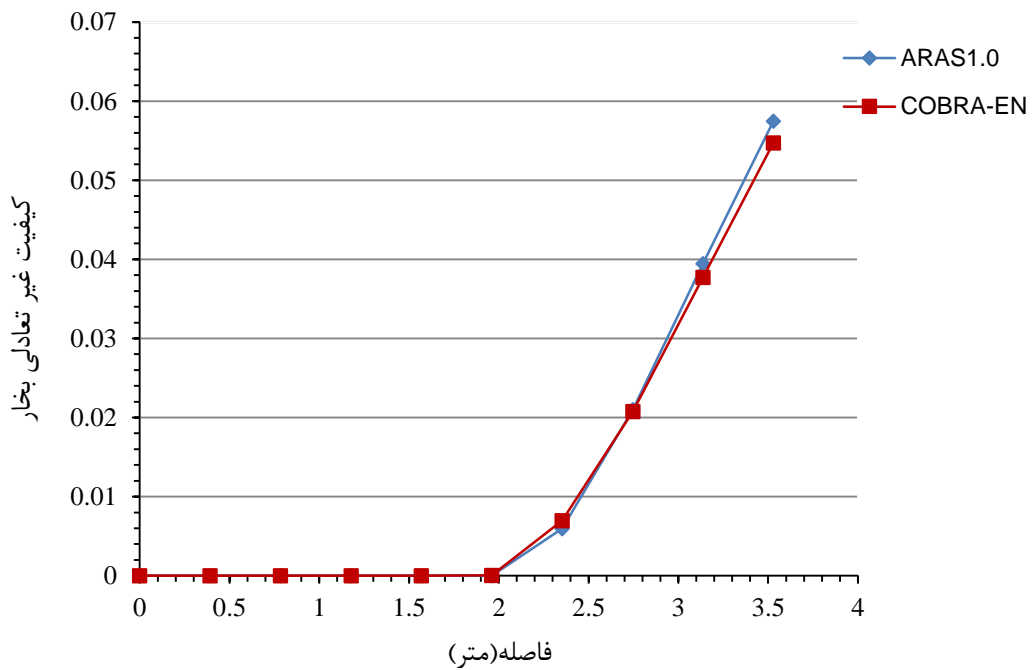
شکل ۴۹: توزیع محوری آنتالپی سیال برای کانال شماره ۵۰ (کانال داغ)



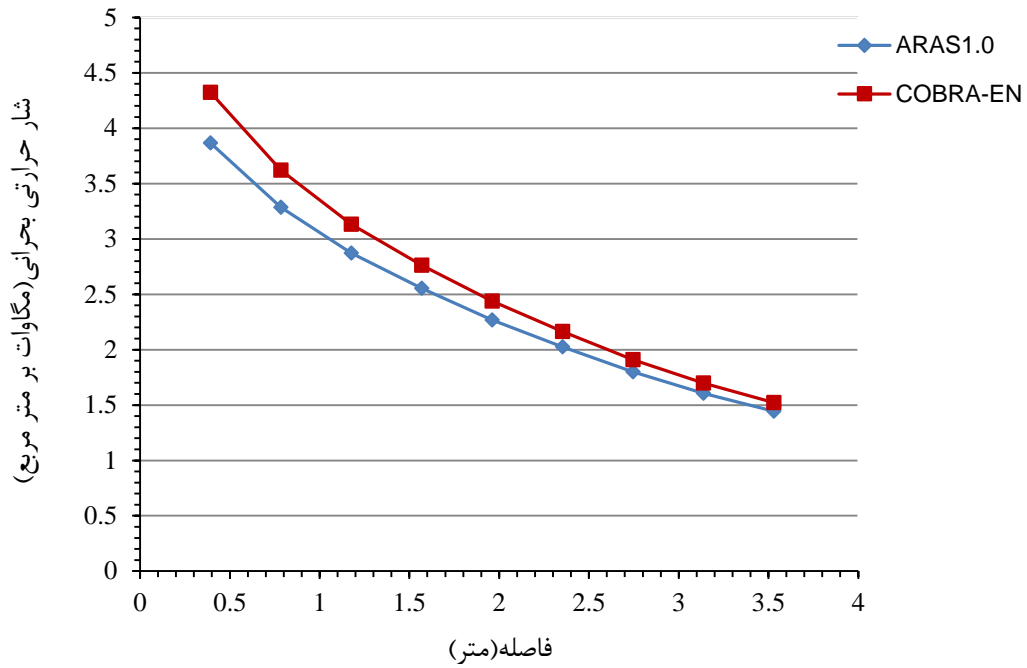
شکل ۵۰: توزیع محوری چگالی سیال برای کانال شماره ۵۰ (کانال داغ)



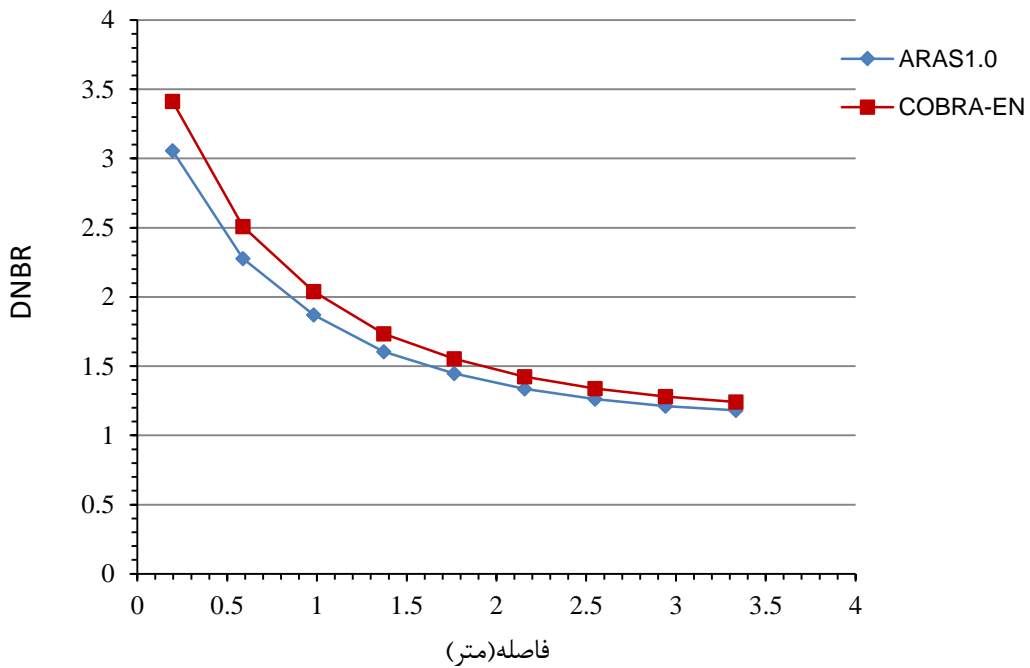
شکل ۵۱: توزیع محوری کسر خلأ برای کانال شماره ۵۰ (کانال داغ)



شکل ۵۲: توزیع محوری کیفیت غیر تعادلی بخار برای کانال شماره ۵۰ (کانال داغ)

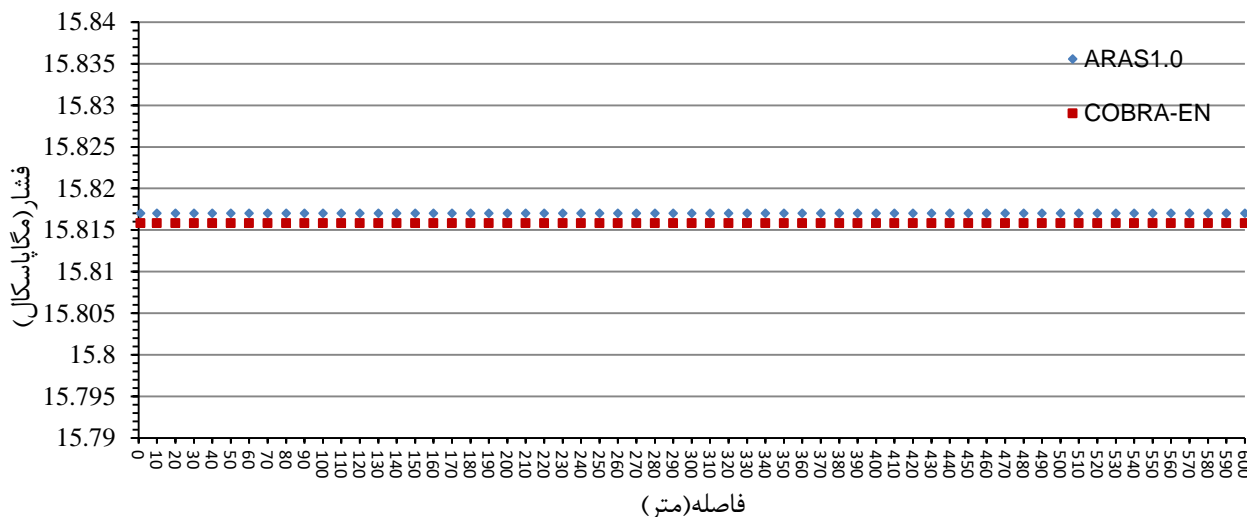


شکل ۵۳: توزیع محوری شار حرارتی بحرانی برای کانال شماره ۵۰ (کانال داغ)

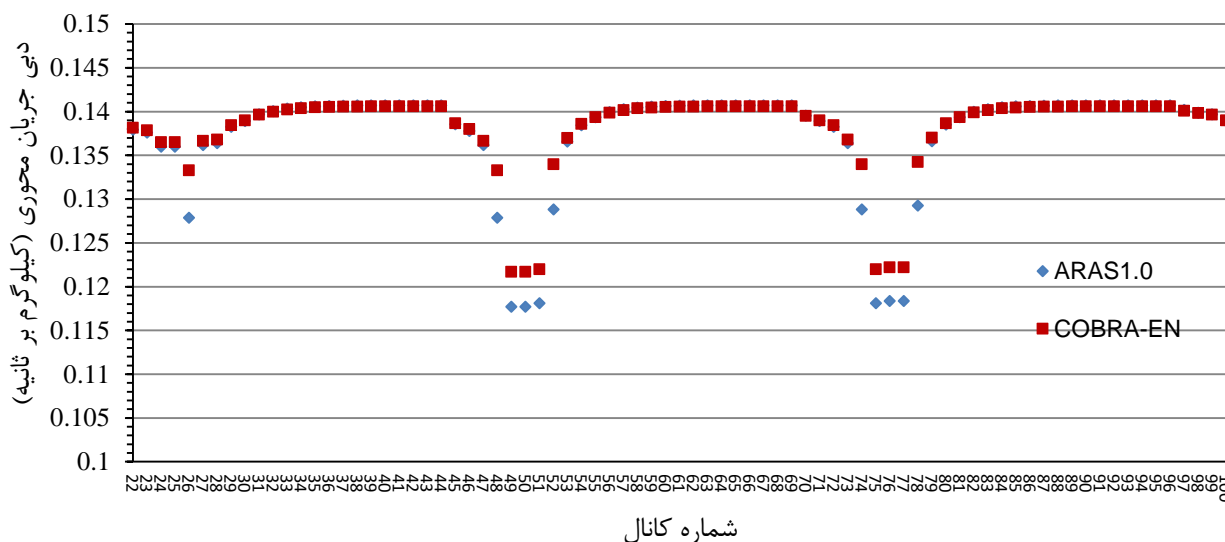


شکل ۵۴: توزیع محوری DNBR برای میله داغ

همچنین در این مسئله نتایج تغییرات فشار در ورودی تعدادی از کانال‌ها به منظور اطمینان از صحت نتایج بدست آمده در شکل ۵۵ رسم گردیده است. با توجه به زیاد بودن تعداد کانال‌ها امکان نمایش تمامی نتایج به تفکیک کانال‌ها وجود نداشته است. هرچند در خروجی کد که به صورت فایل متنی نیز قابل رویت است نتایج برای کلیه پارامترها در دسترس است.

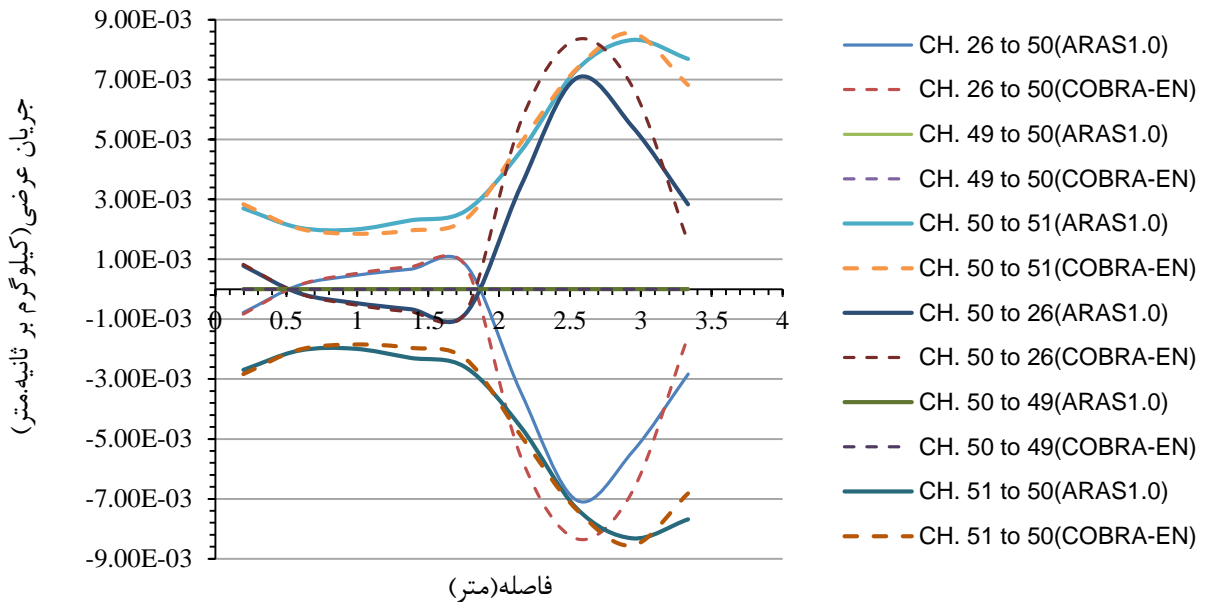


شکل ۵۵: توزیع فشار در ورودی کانال‌ها



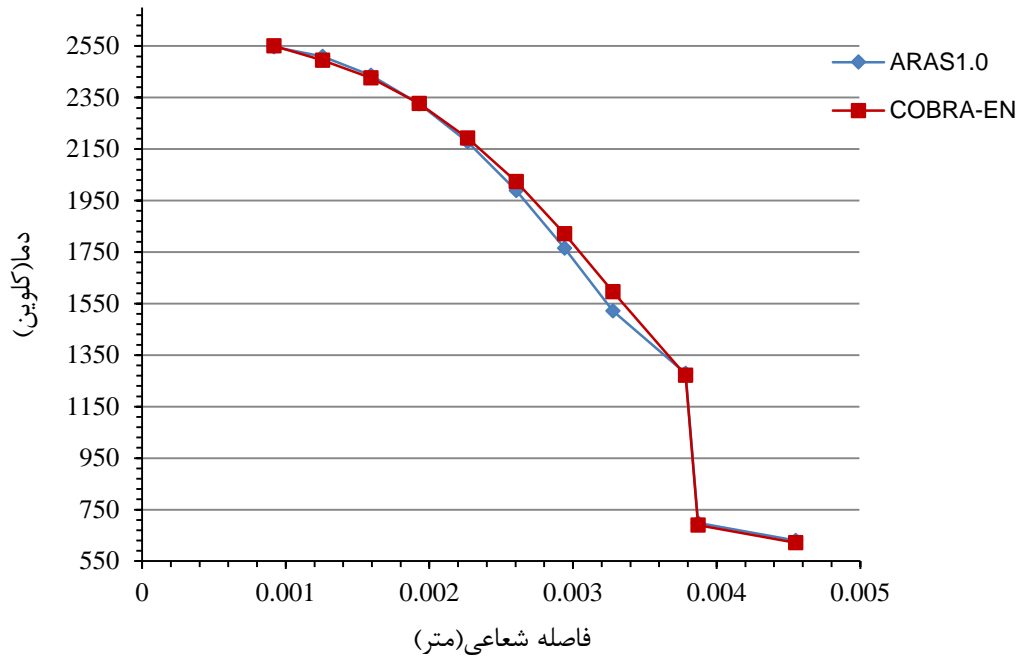
شکل ۵۶: توزیع دبی جریان محوری در خروجی کانال‌ها

در شکل ۵۶، نتایج تغییرات دبی در خروجی تعدادی از کانال‌ها در اطراف کانال داغ با نتایج به دست آمده از کد COBRA-EN مقایسه شده است (در این حالت نیز نمایش کلیه داده‌های به دست آمده امکان‌پذیر نمی‌باشد).

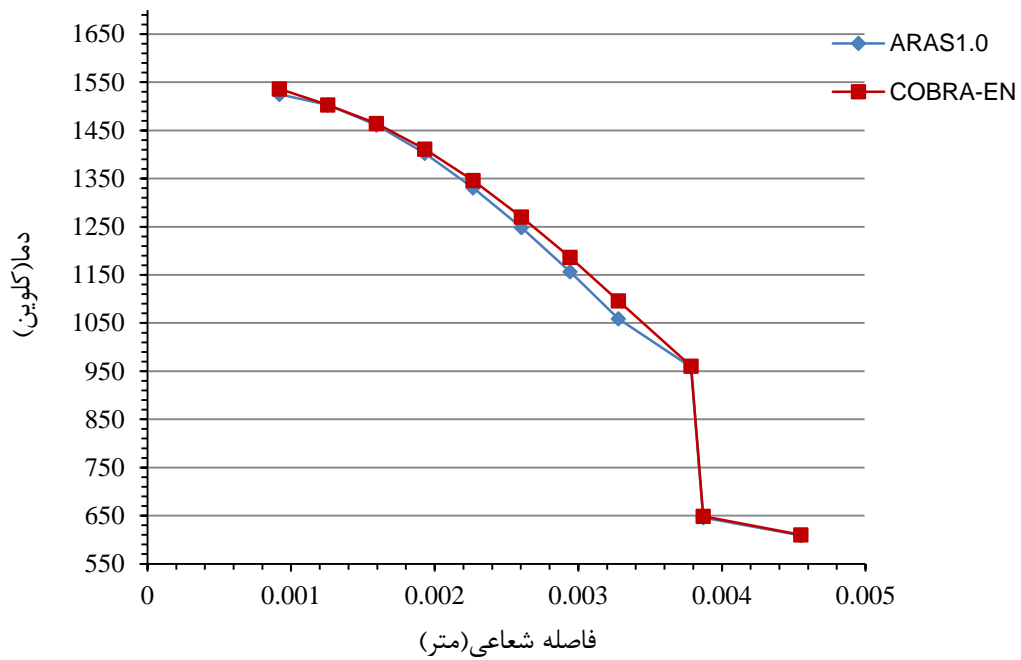


شکل ۵۷: توزیع دبی جریان عرضی میان کانال شماره ۵۰ و کانال‌های همسایه آن

در شکل ۵۷ نتایج حاصل از تبادل دبی جرمی میان کانال داغ شماره ۵۰ با کانال‌های همسایه آن نشان داده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان دریافت که کد ARAS1.0 قادر است به خوبی هندسه‌های تا ابعاد یک مجتمع سوخت را نیز با دقت خوبی تحلیل نماید. در ادامه نتایج برای توزیع شعاعی دمای دو میله سوخت با توان بیشینه و متوسط در شکل ۵۸ و شکل ۵۹ با نتایج حاصل از کد COBRA-EN مقایسه گردیده است.



شکل ۵۸: توزیع شعاعی بیشینه دمای سوخت برای میله داغ



شکل ۵۹: توزیع شعاعی بیشینه دمای سوخت برای میله با توان متوسط

۱۲- نتیجه‌گیری

در این گزارش، تئوری و مهم‌ترین ویژگی‌های کد محاسباتی ARAS1.0 که بر اساس مدل زیرکانال در حالت پایا و در محیط فرترن توسعه داده شده است، ارائه گردیده تا بتوان به کمک آن محاسبات آرایه‌ای از میله‌های سوخت را در یک راکتور به صورت مثلی و مربعی مدل‌سازی نمود. همچنین برای مقایسه نتایج بدست آمده از کد در حالت دوفازی و شرایط پایا، برای چند مسئله نمونه مدل‌سازی مشابهی در کد ترموهیدرولیکی COBRA-EN به عنوان یک کد تجاری مرجع در هر مرحله انجام شده است که نتایج به دست آمده در تمامی این مسائل در تطابق خوبی با یکدیگر قرار دارند. بدیهی است که این تطابق در مدل‌سازی شرایط سیال تک‌فازی نیز برقرار است که در اینجا از ارائه نتایج آن صرف‌نظر شده است. در زیر به برخی از مهم‌ترین ویژگی‌های کد ARAS1.0 اشاره شده است.

- محاسبات انجام شده در کد ARAS1.0 بر پایه مدل زیرکانال و برای جریان دوفازی بر اساس مدل همگن است. بدین ترتیب، دقت جواب‌های مسائل مورد بررسی در این کد بر حسب محدودیت‌های مدل همگن می‌باشد. هرچند راکتورهای آب سبک تحت فشار که در برخی شرایط ممکن است با مقدار کمی کسر خلأ در فواصل محوری انتهایی کانال در حالت پایا روبرو شوند، معمولاً این مدل می‌تواند منجر به نتایج مطلوبی گردد.
- از جمله ویژگی‌های دیگر کد ARAS1.0، مربوط به مدل‌سازی ضریب انتقال حرارت گپ در سوخت می‌باشد، که علاوه بر امکان استفاده از یک مقدار ثابت و بدون در نظر گرفتن تغییرات آن در درجه حرارت‌های متفاوت، می‌توان با استفاده از مدل مناسب تغییرات این ضریب را در راستای محوری در کلیه میله‌های سوخت متناسب با تغییرات دما در نظر گرفت.
- از جمله اقدامات دیگر انجام شده در کد ARAS1.0، ارتقای تعداد صفحات نگهدارنده بوده است که در کد COBRA-EN حداکثر ۱۰ عدد را می‌توان مدل نمود، در حالی که برای راکتورهای همچون راکتور بوشهر، این تعداد، ۱۵ عدد (۱۳ عدد در طول فعال) می‌باشد. در حالت کلی در کد ARAS1.0 می‌توان تعداد دلخواهی از نگهدارنده‌های سوخت تا حداکثر ۲۰ عدد را به کار گرفت.
- کد ARAS1.0 امکان مدل‌سازی سوخت با دو شکل مش‌بندی شعاعی متفاوت و بر حسب سوخت‌های توپر و توخالی را فراهم نموده است. همچنین خواص سوخت در این کد متغیر با دما در نظر گرفته شده است.
- از جمله مسائل مشکل و زمان‌بر در مدل‌سازی در کد COBRA-EN، تعریف چگونگی ارتباط کانال‌ها با یکدیگر و ارتباط میله‌های سوخت با هر کدام از کانال‌ها می‌باشد. در کد ARAS1.0 تمهیدی در نظر گرفته

شده است که تنها با تعریف تعدادی پارامتر هندسی محدود این ارتباطات ایجاد گردد. با استفاده از این اطلاعات، تحلیل ترموهیدرولیکی با استفاده از معادلات مربوطه برای سوخت و سیال انجام می‌شود.

• این کد قادر خواهد بود تا آرایش‌های متنوعی از میله‌های سوخت به صورت مثلثی و مربعی را مدل‌سازی نماید. در این زمینه می‌توان از یک تک کانال متشکل از چهار و یا سه میله سوخت تا یک مجتمع سوخت شش وجهی با ۳۳۱ میله سوخت را تحلیل نمود.

در نهایت با توسعه کد محاسباتی ARAS1.0 در ادامه کار و با افزودن قابلیت‌های محاسباتی دیگر و لحاظ شرایط محاسبات حالت گذرا و نیز استفاده از مدل‌های دقیق‌تر مانند مدل شار رانشی، می‌توان گامی دیگر در مسیر توسعه یک کد محاسباتی با قابلیت استفاده مؤثرتر صنعتی برداشت.

۱۳- مراجع

1. Rowe, D.S., "COBRA-IIIC: a digital computer program for steady state and transient thermal hydraulic analysis of rod bundle nuclear fuel elements", BNWL-195, Battelle-Northwest, Richland, 1973.
2. Basile, D., Beghi, M., Chierici, R., Salina, E., and Brega, E., "COBRA-EN manual, an upgraded version of the COBRA-3C/MIT Code for thermal-hydraulic transient analysis of light water reactor fuel assemblies and cores", ENELCRTN, 1999.
3. Todreas, N.E., Kazimi, M.S., "Nuclear System-II, Elements of Thermal Hydraulic Design", Taylor and Francis, 1990.
4. Todreas, N.E., Kazimi, M.S., "Nuclear Systems I, Thermal Hydraulic Fundamentals", Taylor & Francis, 2nd edition, 1993.
5. Martinelli, R.C., Nelson, D.B., "Prediction of pressure drop during forced circulation boiling of water", Transaction of ASME 70, pp. 695, 1948.
6. Dittus, F.W., Boelter, L.M.K., "heat transfer in automobile radiators of the tubular type", Berkeley, University of California Press, 1930.
7. Chen, J.C., "A Correlation for Boiling Heat Transfer to Saturated Fluids in Convective Flow", Industrial and Engineering Chemical Process Design and Development 5, pp.322-329, 1966.
8. The RELAP5 Code Development Team. "RELAP5/MOD3 Code Manual Volume I: Code Structure, SYSTEM Models, and Solution Methods", Idaho National Engineering Laboratory, 1st Edition, 1995.
9. Wagner, W., Kruse, A., "The industrial standard IAPWS-IF97 for the thermo-dynamic properties and supplementary equations for other properties, properties of water and steam", Springer, 1997.