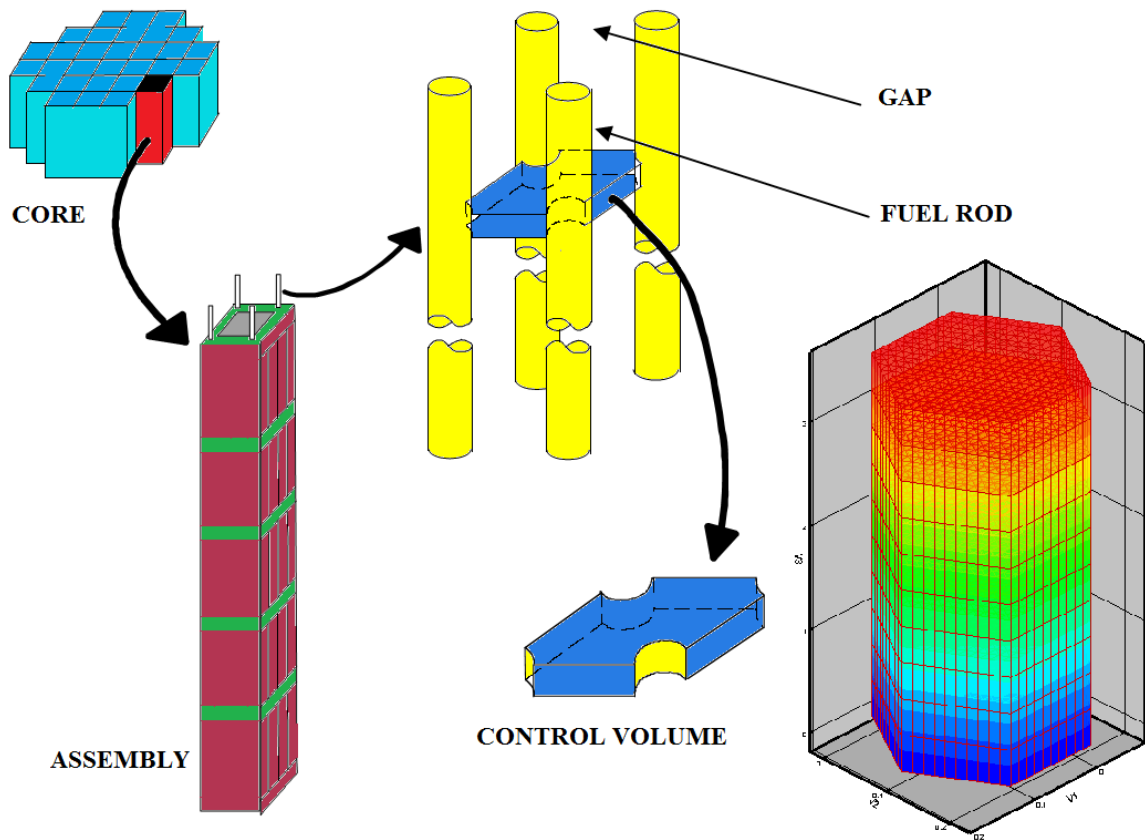


گزارش فنی کد تحلیل ترموهیدرولیکی آرایه‌ای از میله‌های سوخت با استفاده از رویکرد زیر کانال در شرایط گذرا (ARAS 2.0)

THERMAL-HYDRAULIC ANALYSIS OF THE FUEL ROD ARRAYS USING SUBCHANNEL APPROACH IN TRANSIENT CONDITIONS



گزارش فنی کد ARAS2.0

ویرایش ۰ - خرداد ۱۳۹۷

فهرست مطالب

- ۱- چکیده ۱۰
- ۲- کلیدواژه ۱۱
- ۳- اختصارات ۱۱
- ۴- مقدمه ۱۱
- ۵- دامنه گزارش ۱۴
- ۶- معادلات حاکم بر محاسبات سیال ۱۴
- ۶-۱- روش زیرکانال ۱۵
- ۶-۲- معادلات بقای سیال ۱۵
- ۶-۳- گسسته‌سازی معادلات ۲۰
- ۶-۴- روابط کمکی و تجربی ۲۷
- ۶-۴-۱- روابط محاسبه افت فشار اصطکاکی تک فاز ۲۷
- ۶-۴-۲- ضریب افت فشار اصطکاکی دوفازی ۲۷
- ۶-۴-۳- مدل جوشش مادون سرد ۲۸
- ۶-۴-۴- مدل روابط کسر خلأ و کیفیت بخار ۳۰
- ۶-۴-۵- دبی جرمی جریان عرضی متلاطم ۳۰
- ۷- مدل سازی انتقال حرارت در میله سوخت ۳۱
- ۷-۱- مدل انتقال حرارت رسانش سوخت ۳۲
- ۷-۲- مدل انتقال حرارت سطح غلاف و سیال ۳۲
- ۷-۳- مدل انتقال حرارت گپ سوخت و غلاف ۳۵
- ۷-۴- مدل سازی شار حرارتی بحرانی ۳۸

- ۷-۵- شبکه‌بندی و گسسته‌سازی معادلات سوخت ۳۹
- ۸- شرایط مرزی و اولیه ۴۲
- ۹- توصیف الگوریتم محاسباتی ۴۳
- ۱۰- اعتبارسنجی نتایج ۴۴
- ۱۰-۱- مسئله شماره ۱ ۴۵
- ۱۰-۲- مسئله شماره ۲ ۵۶
- ۱۰-۳- مسئله شماره ۳ ۶۸
- ۱۰-۴- مسئله شماره ۴ ۸۰
- ۱۰-۵- مسئله شماره ۵ ۹۱
- ۱۱- نتیجه‌گیری ۱۰۲
- ۱۲- مراجع ۱۰۴

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱: نمایی از حجم بندی سیال در مرکز ۱۳
- شکل ۲: نمایی از حجم بندی میله در مرکز ۱۳
- شکل ۳: نمایش و شماره‌گذاری کانال‌های همسایه در محاسبات زیرکانال ۱۶
- شکل ۴: حجم کنترل انتخاب شده برای معادله مومنتوم عرضی ۱۹
- شکل ۵: نمونه مش‌بندی کانال‌های سیال در روش زیرکانال با رویکرد سیال در مرکز ۲۱
- شکل ۶: حجم کنترل در نظر گرفته شده برای معادلات بقا ۲۲
- شکل ۷: حجم کنترل در نظر گرفته شده برای معادلات بقا(نمای جانبی) ۲۲
- شکل ۸: حجم‌بندی میله سوخت در راستای شعاعی(مدل اول) ۴۰
- شکل ۹: حجم‌بندی میله سوخت در راستای شعاعی(مدل دوم) ۴۰
- شکل ۱۰: روند نمای حل معادلات سیال و سوخت در کد ARAS2.0 ۴۴
- شکل ۱۱: آرایش میله‌ها و کانال‌ها در مسئله شماره ۱ ۴۵
- شکل ۱۲: توزیع محوری شار حرارتی در میله‌های داغ و با توان متوسط ۴۶
- شکل ۱۳: توزیع محوری فشار برای کانال شماره ۱(کانال داغ) ۴۷
- شکل ۱۴: توزیع محوری دمای سیال برای کانال شماره ۱(کانال داغ) ۴۷
- شکل ۱۵: توزیع محوری آنتالپی سیال برای کانال شماره ۱(کانال داغ) ۴۸
- شکل ۱۶: توزیع محوری چگالی سیال برای کانال شماره ۱(کانال داغ) ۴۸
- شکل ۱۷: توزیع محوری شار حرارتی بحرانی برای کانال شماره ۱(کانال داغ) ۴۹
- شکل ۱۸: توزیع محوری DNBR برای میله داغ ۴۹
- شکل ۱۹: توزیع شعاعی بیشینه دمای سوخت برای میله داغ ۵۰
- شکل ۲۰: تغییرات زمانی فشار در ورودی برای کانال شماره ۱(کانال داغ) ۵۱
- شکل ۲۱: تغییرات زمانی دمای سیال در خروجی برای کانال شماره ۱(کانال داغ) ۵۱
- شکل ۲۲: تغییرات زمانی آنتالپی سیال در خروجی برای کانال شماره ۱(کانال داغ) ۵۲
- شکل ۲۳: تغییرات زمانی کسر خلأ سیال در خروجی برای کانال شماره ۱(کانال داغ) ۵۲
- شکل ۲۴: تغییرات زمانی کیفیت غیر تعادلی بخار سیال در خروجی برای کانال شماره ۱(کانال داغ) ۵۳
- شکل ۲۵: تغییرات زمانی دبی جریان محوری سیال در خروجی کانال داغ(کانال شماره ۱) ۵۳

- شکل ۲۶: تغییرات دبی جریان عرضی از کانال داغ به کانال‌های همسایه آن در سه مقطع زمانی در طول کانال‌ها ۵۴
- شکل ۲۷: تغییرات زمانی کمینه شار حرارتی بحرانی برای کانال شماره ۱ (کانال داغ) ۵۵
- شکل ۲۸: تغییرات DNBR در انتهای میله داغ ۵۵
- شکل ۲۹: تغییرات زمانی بیشینه دمای مرکز سوخت برای میله داغ ۵۶
- شکل ۳۰: آرایش ۲۵ میله سوخت در آرایش چهار وجهی ۵۷
- شکل ۳۱: توزیع محوری شار حرارتی در میله‌های داغ و با توان متوسط ۵۸
- شکل ۳۲: توزیع محوری فشار برای کانال شماره ۲ (کانال داغ) ۵۸
- شکل ۳۳: توزیع محوری دمای سیال برای کانال شماره ۲ (کانال داغ) ۵۹
- شکل ۳۴: توزیع محوری آنتالپی سیال برای کانال شماره ۲ (کانال داغ) ۵۹
- شکل ۳۵: توزیع محوری چگالی سیال برای کانال شماره ۲ (کانال داغ) ۶۰
- شکل ۳۶: توزیع محوری کسر خلأ برای کانال شماره ۲ (کانال داغ) ۶۰
- شکل ۳۷: توزیع محوری کیفیت غیر تعادلی بخار برای کانال شماره ۲ (کانال داغ) ۶۱
- شکل ۳۸: توزیع محوری شار حرارتی بحرانی برای کانال شماره ۲ (کانال داغ) ۶۱
- شکل ۳۹: توزیع محوری DNBR برای میله داغ ۶۲
- شکل ۴۰: توزیع شعاعی بیشینه دمای سوخت برای میله داغ ۶۲
- شکل ۴۱: تغییرات زمانی فشار سیال در ورودی کانال ۶۳
- شکل ۴۲: تغییرات زمانی دمای سیال در خروجی کانال داغ (کانال شماره ۲) ۶۳
- شکل ۴۳: تغییرات زمانی آنتالپی سیال در خروجی کانال داغ (کانال شماره ۲) ۶۴
- شکل ۴۴: تغییرات زمانی کسر خلأ سیال در خروجی کانال داغ (کانال شماره ۲) ۶۴
- شکل ۴۵: تغییرات زمانی کیفیت غیرتعادلی بخار سیال در خروجی کانال داغ (کانال شماره ۲) ۶۵
- شکل ۴۶: تغییرات زمانی دبی جریان محوری سیال در خروجی کانال داغ (کانال شماره ۲) ۶۵
- شکل ۴۷: تغییرات دبی جریان عرضی از کانال داغ به کانال‌های همسایه آن در سه مقطع زمانی در طول کانال‌ها ۶۶
- شکل ۴۸: تغییرات زمانی شار حرارت بحرانی در خروجی کانال داغ (کانال شماره ۲) ۶۶
- شکل ۴۹: تغییرات زمانی DNBR در فاصله انتهایی میله داغ ۶۷

- شکل ۵۰: تغییرات زمانی بیشینه دمای مرکز سوخت برای میله داغ ۶۷
- شکل ۵۱: آرایش ۳۳۱ میله سوخت مثلثی ۶۸
- شکل ۵۲: توزیع توان در میله‌های سوخت با توان بیشینه و متوسط ۶۹
- شکل ۵۳: توزیع محوری فشار برای کانال شماره ۵۰ (کانال داغ) ۷۰
- شکل ۵۴: توزیع محوری دمای سیال برای کانال شماره ۵۰ (کانال داغ) ۷۰
- شکل ۵۵: توزیع محوری آنتالپی سیال برای کانال شماره ۵۰ (کانال داغ) ۷۱
- شکل ۵۶: توزیع محوری چگالی سیال برای کانال شماره ۵۰ (کانال داغ) ۷۱
- شکل ۵۷: توزیع محوری کسر خلأ برای کانال شماره ۵۰ (کانال داغ) ۷۲
- شکل ۵۸: توزیع محوری کیفیت غیر تعادلی بخار برای کانال شماره ۵۰ (کانال داغ) ۷۲
- شکل ۵۹: توزیع محوری شار حرارتی بحرانی برای کانال شماره ۵۰ (کانال داغ) ۷۳
- شکل ۶۰: توزیع محوری DNBR برای میله داغ ۷۳
- شکل ۶۱: توزیع شعاعی بیشینه دمای سوخت برای میله داغ ۷۴
- شکل ۶۲: تغییرات زمانی فشار در ورودی کانال داغ (شماره ۵۰) ۷۵
- شکل ۶۳: تغییرات زمانی دمای سیال در خروجی کانال داغ (شماره ۵۰) ۷۵
- شکل ۶۴: تغییرات زمانی آنتالپی سیال در خروجی کانال داغ (شماره ۵۰) ۷۶
- شکل ۶۵: تغییرات زمانی کسر خلأ در خروجی کانال داغ (شماره ۵۰) ۷۶
- شکل ۶۶: تغییرات زمانی کیفیت غیر تعادلی بخار در خروجی کانال داغ (شماره ۵۰) ۷۷
- شکل ۶۷: تغییرات زمانی دبی جریان محوری سیال در خروجی کانال داغ (شماره ۵۰) ۷۷
- شکل ۶۸: تغییرات دبی جریان عرضی از کانال داغ به کانال‌های همسایه آن در دو مقطع زمانی در طول کانال‌ها ۷۸
- شکل ۶۹: تغییرات زمانی کمینه شار حرارتی بحرانی در خروجی کانال داغ (شماره ۵۰) ۷۸
- شکل ۷۰: تغییرات زمانی DNBR در انتهای میله داغ ۷۹
- شکل ۷۱: تغییرات زمانی بیشینه دمای مرکز سوخت در میله داغ ۷۹
- شکل ۷۲: آرایش ۹ میله سوخت در آرایش چهار وجهی ۸۰
- شکل ۷۳: توزیع محوری فشار در طول کانال شماره ۲ (کانال داغ) ۸۲
- شکل ۷۴: توزیع محوری دمای سیال در طول کانال شماره ۲ (کانال داغ) ۸۲

- شکل ۷۵: توزیع محوری آنتالپی در طول کانال شماره ۲ (کانال داغ) ۸۳
- شکل ۷۶: توزیع محوری چگالی سیال در طول کانال شماره ۲ (کانال داغ) ۸۳
- شکل ۷۷: توزیع محوری کسر خلأ در طول کانال شماره ۲ (کانال داغ) ۸۴
- شکل ۷۸: توزیع محوری کیفیت غیر تعادلی بخار در طول کانال شماره ۲ (کانال داغ) ۸۴
- شکل ۷۹: توزیع محوری شار حرارتی بحرانی در طول کانال شماره ۲ (کانال داغ) ۸۵
- شکل ۸۰: توزیع محوری DNBR برای میله داغ ۸۵
- شکل ۸۱: توزیع محوری دمای سوخت برای میله داغ ۸۶
- شکل ۸۲: تغییرات زمانی فشار در ورودی کانال داغ ۸۶
- شکل ۸۳: تغییرات زمانی دمای سیال در خروجی کانال شماره ۲ (کانال داغ) ۸۷
- شکل ۸۴: تغییرات زمانی آنتالپی سیال در خروجی کانال شماره ۲ (کانال داغ) ۸۷
- شکل ۸۵: تغییرات زمانی کسر خلأ سیال در خروجی کانال شماره ۲ (کانال داغ) ۸۸
- شکل ۸۶: تغییرات زمانی کیفیت غیر تعادلی بخار در خروجی کانال شماره ۲ (کانال داغ) ۸۸
- شکل ۸۷: تغییرات زمانی دبی جریان محوری سیال در خروجی کانال شماره ۲ (کانال داغ) ۸۹
- شکل ۸۸: تغییرات دبی جریان عرضی از کانال داغ به کانال‌های همسایه آن در سه مقطع زمانی در طول کانال‌ها ۸۹
- شکل ۸۹: تغییرات زمانی شار حرارتی بحرانی سیال در خروجی کانال شماره ۲ (کانال داغ) ۹۰
- شکل ۹۰: تغییرات زمانی DNBR برای فاصله انتهایی میله داغ ۹۰
- شکل ۹۱: تغییرات زمانی بیشینه دمای مرکز سوخت برای میله داغ ۹۱
- شکل ۹۲: نحوه تغییرات نرمال شده پارامترهای حالت گذرا ۹۲
- شکل ۹۳: توزیع محوری فشار در طول کانال داغ ۹۳
- شکل ۹۴: توزیع محوری دمای سیال در طول کانال شماره ۹ (کانال داغ) ۹۳
- شکل ۹۵: توزیع محوری آنتالپی سیال در طول کانال شماره ۹ (کانال داغ) ۹۴
- شکل ۹۶: توزیع محوری چگالی سیال در طول کانال شماره ۹ (کانال داغ) ۹۴
- شکل ۹۷: توزیع محوری کسر خلأ در طول کانال شماره ۹ (کانال داغ) ۹۵
- شکل ۹۸: توزیع محوری کیفیت غیر تعادلی بخار در طول کانال شماره ۹ (کانال داغ) ۹۵
- شکل ۹۹: توزیع محوری شار حرارتی بحرانی در طول کانال شماره ۹ (کانال داغ) ۹۶

- شکل ۱۰۰: توزیع محوری DNBR برای میله داغ ۹۶
- شکل ۱۰۱: توزیع محوری دمای میله سوخت برای میله داغ ۹۷
- شکل ۱۰۲: تغییرات زمانی فشار در ورودی کانال داغ ۹۷
- شکل ۱۰۳: تغییرات زمانی دمای سیال در خروجی کانال شماره ۹ (کانال داغ) ۹۸
- شکل ۱۰۴: تغییرات زمانی آنتالپی سیال در خروجی کانال شماره ۹ (کانال داغ) ۹۸
- شکل ۱۰۵: تغییرات زمانی کسر خلأ در خروجی کانال شماره ۹ (کانال داغ) ۹۹
- شکل ۱۰۶: تغییرات زمانی کیفیت غیر تعادلی بخار در خروجی کانال شماره ۹ (کانال داغ) ۹۹
- شکل ۱۰۷: تغییرات زمانی دبی جریان محوری در خروجی کانال شماره ۹ (کانال داغ) ۱۰۰
- شکل ۱۰۸: تغییرات دبی جریان عرضی از کانال داغ به کانال‌های همسایه آن در سه مقطع زمانی در طول کانال‌ها ۱۰۰
- شکل ۱۰۹: تغییرات زمانی شار حرارت بحرانی در خروجی کانال شماره ۹ (کانال داغ) ۱۰۱
- شکل ۱۱۰: تغییرات زمانی DNBR برای میله داغ ۱۰۱
- شکل ۱۱۱: تغییرات زمانی بیشینه دمای مرکز سوخت برای میله داغ ۱۰۲

فهرست جدول‌ها

جدول شماره ۱: مقادیر ثابت‌های A و B برای گازها	۳۷
جدول شماره ۲: مشخصات مسائل منتخب	۴۵
جدول شماره ۳: مشخصات مسئله شماره ۱	۴۶
جدول شماره ۴: مشخصات مسئله شماره ۲	۵۷
جدول شماره ۵: مشخصات مسئله شماره ۳	۶۹
جدول شماره ۶: مشخصات مسئله شماره ۴	۸۱
جدول شماره ۷: مشخصات مسئله شماره ۵	۹۲

۱- چکیده

با توجه به اهمیت مدل‌سازی دقیق قلب راکتورهای هسته‌ای در حالت پایا و گذرا، به منظور پیش‌بینی حوادث احتمالی و اثرات آن، کد محاسباتی ARAS2.0 توسعه داده شده است. پیش از این در کد ARAS1.0، 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 گرفت. هرچند با توجه به اهمیت بررسی حالت گذرا و تعیین پارامترهای سیال خنک‌کننده و میله سوخت، لزوم توسعه حالت گذرا مشخص خواهد بود. بدین ترتیب کد ARAS 2.0 به گونه‌ای توسعه یافته است، که با حفظ تمام ویژگی‌ها و خصوصیات کد ARAS1.0، بتوان محاسبات را در حالت گذرای توان تولیدی در میله سوخت، دبی جریان ورودی، درجه حرارت مادون‌سرد سیال ورودی و فشار خروجی انجام داد. بنابراین در کد ARAS2.0، از مدل همگن و با امکان لحاظ نمودن نسبت لغزش مخالف یک برای مدل‌سازی جریان سیال استفاده شده است. همچنین در این کد، قابلیت انتخاب فواصل طولی به صورت غیر یکسان علاوه بر امکان مدل‌سازی نگهدارنده‌های سوخت (مهارکننده‌ها) تا حداکثر ۲۰ عدد اضافه گردیده است. از طرف دیگر، 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 فاصله گازی (گپ) به صورت ثابت یا متغیر (بر حسب کسر مولی گازها) به دست می‌آید. نکته قابل توجه دیگر در مدل‌سازی میله‌های سوخت، امکان انتخاب خواص حرارتی قرص سوخت و غلاف به صورت ثابت و یا وابسته به دما می‌باشد. در نهایت، 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 ARAS2.0، 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.

¹ Fortran90

۲- کلیدواژه

کد ARAS2.0، روش زیرکانال، مدل همگن، جریان دوفاز، شرایط پایا، شرایط گذرا، کد COBRA-EN

۳- اختصارات

عبارت	عبارت اختصاری	توضیح
Coolant Boiling in Rod Arrays	COBRA	کد محاسباتی ترموهیدرولیکی حالت گذرای قلب و مجتمع سوخت راکتور هسته‌ای آب سبک
Homogenous Equilibrium Model	HEM	مدل تعادلی همگن
Thermal-hydraulic Analysis of the Fuel Rod Arrays Using Subchannel Approach in Steady-state	ARAS1.0	کد محاسباتی ترموهیدرولیکی آرایه‌ای از میله‌های سوخت در حالت پایا با استفاده از روش زیرکانال
Thermal-hydraulic Analysis of the Fuel Rod Arrays Using Subchannel Approach in transient	ARAS2.0	کد محاسباتی ترموهیدرولیکی آرایه‌ای از میله‌های سوخت در حالت گذرا با استفاده از روش زیرکانال
Departure from Nucleate Boiling Ratio	DNBR	نسبت انحراف از جوشش هسته‌ای

۴- مقدمه

مدل‌سازی قلب راکتورهای هسته‌ای و بررسی ترموهیدرولیکی آن از مهم‌ترین مسائل در طراحی یک راکتور هسته‌ای به شمار می‌رود. در زمینه تحلیل زیرکانال کدهای تجاری متنوعی توسعه یافته است که از مهم‌ترین آنها می‌توان به کد COBRA-EN اشاره نمود. این کد که برای بررسی قلب و مجتمع‌های سوخت راکتورهای آب سبک با رویکرد زیرکانال توسعه یافته است، در کد ARAS2.0 برای مقایسه استفاده شده است [۱].

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. 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 [۲].

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 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:

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

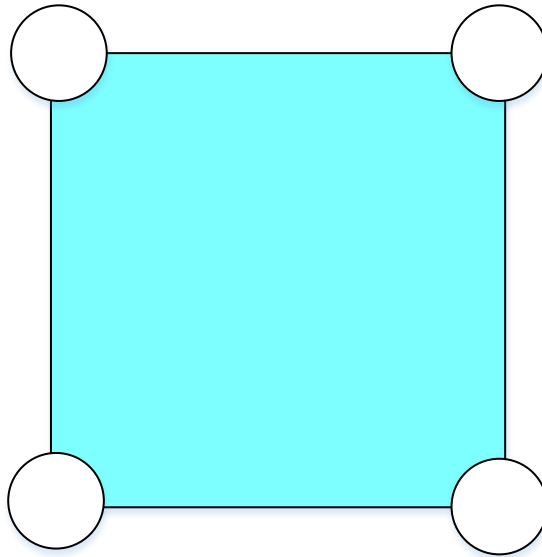
(۲) دیدگاه میله در مرکز: حالتی که سوخت در وسط و سیال در اطراف آن در جریان باشد.

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.

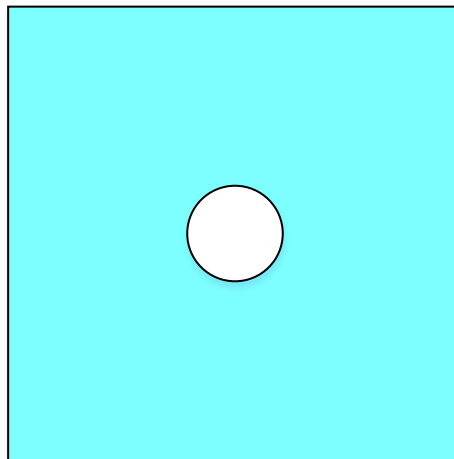
¹ Sub-channel approach

² Porous media approach

³ Lumped



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

¹ Homogenous model

² Drift-flux model

³ Two-fluid

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 کد ARAS2.0، 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 و همبسته‌سازی معادلات سوخت و سیال در حالت گذرا در نظر گرفته شده است.

۵- دامنه گزارش

در این گزارش، برنامه توسعه داده شده در کد ARAS2.0 در حالت گذرا توصیف خواهد شد. بر این اساس می‌توان رفتار زمانی پارامترهای سیال و میله سوخت را در حالت‌های گذرای مورد نظر در آرایه‌ای از میله‌های سوخت به دست آورد. برای اعتبارسنجی کد توسعه داده شده، پس از تبیین مسائلی در محدوده برنامه، مسائل مشابه در کد COBRA-EN مدل‌سازی شده است و نتایج آن با نتایج به دست آمده از کد ARAS2.0 مقایسه گردیده است. لازم به ذکر است، مدل دوفازی توسعه داده شده در کد ARAS2.0، مدل همگن می‌باشد.

۶- معادلات حاکم بر محاسبات سیال

در حالت کلی جهت مدل‌سازی رفتار سیال در حالت دوفازی سه معادله بقای اصلی جرم، انرژی و مومنوم مورد نیاز است که هر یک بایستی در فضای محاسباتی مورد نظر گسسته شده و پس از تعیین سایر پارامترهای کمکی برای یک مسئله با استفاده از یک روندنمای مناسب حل گردد. در ادامه هر یک از این معادلات شرح داده خواهد شد.

۶-۱- روش زیرکانال

در روش زیرکانال که زیرمجموعه‌ای از روش کلی‌تر محیط متخلخل^۱ است، 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.

۶-۲- معادلات بقای سیال

معادلات اصلی به کار رفته در تحلیل ترموهیدرولیکی سیال عبوری از کانال‌های جریان، با استفاده از روش سه معادله‌ای شامل معادله بقای جرم، مومنتوم و انرژی می‌باشد که معادله مومنتوم با توجه به ارتباط میان کانال‌ها به دو معادله مومنتوم محوری و مومنتوم جانبی تقسیم می‌شود. این معادلات در فضای تک بعدی به صورت زیر نوشته می‌شوند:

- معادله بقای جرم

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho A + \frac{\partial}{\partial z} \dot{m} + \sum_{k \in i} e_{ik} w = 0 \quad (1-6)$$

که در آن:

\dot{m} = دبی جرمی محوری سیال (kg/s)

w = دبی جرمی جریان عرضی سیال به ازای واحد طول (kg/m.s)

ρ = چگالی سیال (kg/m^3)

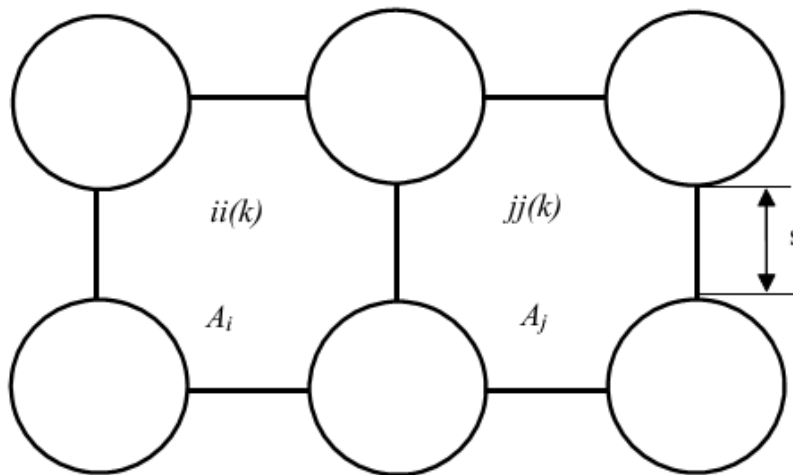
A = مساحت کانال (m^2)

^۱ Porous media approach

در معادله (۶-۱)، k شماره سطح مشترک دو کانال مجاور است که جریان عرضی از طریق آن، میان دو کانال مبادله می‌گردد. e_{ik} مقداری برای تعیین جهت جریان‌های عرضی برای کانال‌های مجاور یکدیگر با شماره‌های i و i' است که به صورت ذیل در نظر گرفته شده است:

$$e_{ik} = \begin{cases} 1, & i < i' \\ -1, & i > i' \end{cases} \quad (۶-۲)$$

در حالت کلی جهت مثبت جریان عرضی برای ورودی به یک کانال و جهت منفی آن برای خروجی از یک کانال تعریف می‌شود. بدین ترتیب برای هر کانال مانند $ii(k)$ ، یک شماره اختصاص داده می‌شود (i) که بر اساس آن در مواردی که شماره کانال همسایه آن (i')، یعنی $jj(k)$ ، بزرگتر باشد، جریان مثبت از کانال $ii(k)$ به $jj(k)$ خواهد بود (k ، اندیس مرز بین دو کانال است). این شماره‌گذاری در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: نمایش و شماره‌گذاری کانال‌های همسایه در محاسبات زیرکانال

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:

$$\dot{m} = \rho u A \quad (۶-۳)$$

$$w = \rho v s \quad (۶-۴)$$

در این روابط، u و v به ترتیب سرعت در راستای طولی و عرضی کانال‌ها و A سطح مقطع در جهت محوری و s فاصله عرضی میان دو کانال مجاور است. با توجه به تعریف پارامترهای مذکور برای مخلوط، بایستی چگالی مخلوط را بر حسب چگالی هر یک از فازها محاسبه نمود:

$$\rho = \rho_g \alpha + \rho_1 (1 - \alpha) \quad (5-6)$$

ρ_1 : چگالی مایع (kg/m^3)

ρ_g : چگالی بخار (kg/m^3)

α ، کسر خلأ است که با فرض اینکه در هر لحظه در یک نقطه از فضا تنها یک فاز موجود باشد، می‌توان نوشت:

$$\sum \alpha_k = 1 \quad (6-6)$$

معمولاً، در مواردی که به عنوان مثال تغییرات شدید 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 این گزارش، فرض می‌شود که گردابه‌های جریان منجر به تبادل جرم خالص میان کانال‌ها نگردد. به همین دلیل همانند کد تجاری COBRA-EN، در معادله بقای جرم، دبی جریان عرضی متلاطم^۱ در نظر گرفته نشده است. با این وجود این گردابه‌ها می‌توانند با خود مومنتوم را منتقل نمایند. برای محاسبه مقدار این جریان که با w' نمایش داده می‌شود از روابط تجربی استفاده شده است [۱].

– معادله بقای مومنتوم

در معادله بقای مومنتوم، ابتدا فرض می‌شود که هیچ جریان سیالی از دیواره‌های میله سوخت عبور نکند و برای جریان‌های طولی و عرضی با توجه به اختلاف در تعریف حجم‌های مورد نظر، معادلات جداگانه‌ای بایستی برای هر کدام تعریف گردد. برای جریان طولی، شکل کاربردی این معادله در راستای محور طولی کانال‌ها عبارت است از:

$$\frac{\partial \rho A u}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \rho u^2 A + \sum_{k \in i} (e_{ik} \rho u v_s) = -A \frac{\partial P}{\partial z} - \frac{1}{2} \left(\frac{f_w}{D_h} + k' \right) \rho u |u| A - f_t \sum_{k \in i} w' (\Delta u) - A \rho g \cos \theta \quad (7-6)$$

^۱Turbulent cross flowrate

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 جریان عرضی

k' : ضریب افت فشار برای نگهدارنده‌های سوخت

D_h : قطر هیدرولیکی کانال (m)

s: فاصله مرزی میان دو کانال (گپ) (m)

w: دبی جرمی جریان عرضی بر واحد طول ($kg/m.s$)

با تعریف جملات زیر برای شار جرمی محوری و عرضی و ارتباط آنها به پارامترهایی همچون سرعت و چگالی می‌توان نوشت:

$$\rho u^2 A = \frac{\dot{m}^2}{A} v' \quad (۸-۶)$$

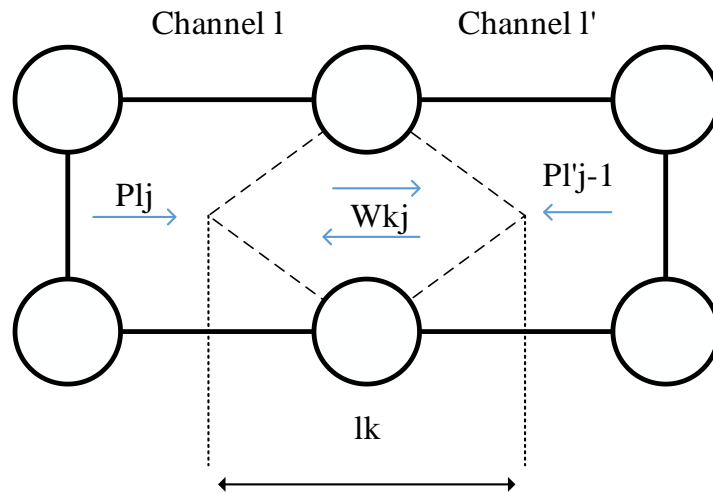
$$\rho u v s = \frac{\dot{m}}{A} w v' \quad (۹-۶)$$

که در آن v' حجم مخصوص است و با توجه به کیفیت بخار، x ، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$v' = \frac{x^2}{\alpha \rho_v} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha)\rho_l} \quad (۱۰-۶)$$

نهایتاً برای محاسبه جریان عرضی بین کانال‌ها از معادله بقای مومنتوم در جهت عرضی استفاده می‌شود. برای توسعه معادله مذکور حجم کنترل انتخاب شده از مراکز دو کانال مجاور انتخاب می‌شود (فاصله میان این مراکز برابر با l می‌باشد). این حجم کنترل در شکل ۴ نشان داده شده است. عامل اصلی تولید این جریان اختلاف فشار میان دو کانال می‌باشد. این معادله به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$\frac{\partial \rho v s}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (s \rho u v) = \frac{s}{l} (P_{l+\Delta l} - P_l) - \frac{1}{2} \left(K_G \frac{s}{l} \right) \rho |v| v \quad (11-6)$$



شکل ۴: حجم کنترل انتخاب شده برای معادله مومنوم عرضی

در این رابطه، مقدار اختلاف فشار در دو طرف گپ (فاصله میان میله‌ها) در مقطع ورودی کانال‌ها در نظر گرفته می‌شود. همچنین در این معادله، K_G ضریب مقاومت جریان عرضی است. سایر پارامترها مشابه قبل تعریف می‌شوند.

- معادله بقای انرژی

$$\frac{\partial \rho A h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \rho u A h + \sum_{k \in i} e_{ik} \rho v s h = \sum_{m \in i} \phi_{im} P_h q''_w + \sum_{m \in i} \phi_{im} r_q q' - \sum_{k \in i} w' (\Delta h) - \sum_{k \in i} C_k s_k (\Delta T) \quad (12-6)$$

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)

T_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 است که به وسیله معادله ذیل بدست می‌آید:

$$C_K = G_T \bar{k} / l \quad (13-6)$$

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

G_T : ضریب هندسی برای ضریب هدایت حرارتی

همچنین آنتالپی مخلوط از طریق رابطه (۶-۱۴) به آنتالپی هر یک از فازها مرتبط می‌شود:

$$ph = \rho_v \alpha h_v + \rho_l (1 - \alpha) h_l \quad (14-6)$$

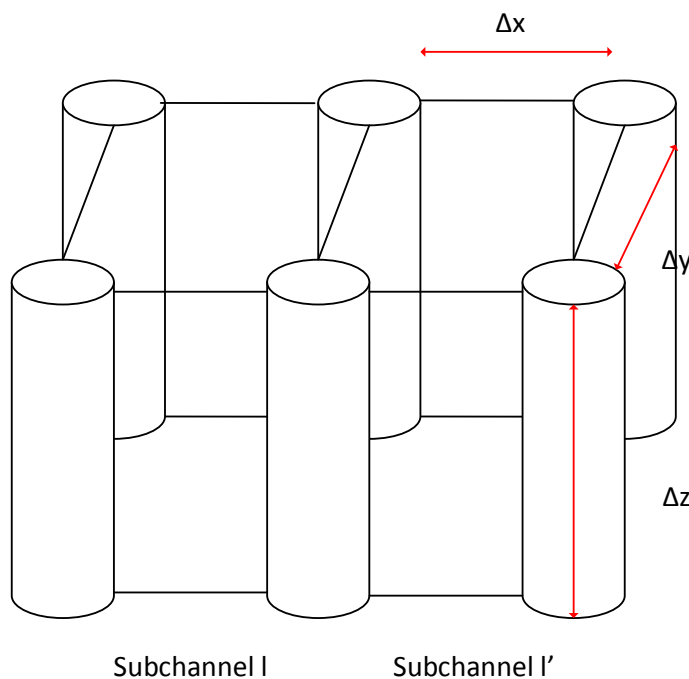
معادلات به دست آمده، معادلات توصیف‌کننده سیال در محاسبات انجام شده در این گزارش بر اساس مدل سه‌معادله‌ای است که بر حسب نیاز می‌توانند به شکل مناسب‌تری ساده شوند. روش حل عددی این معادلات در بخش‌های بعدی توضیح داده می‌شود.

۶-۳- گسسته‌سازی معادلات

پس از ارائه روابط اصلی مورد استفاده برای 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.

در روش زیرکانال که مبنای محاسبات انجام شده در کد ARAS2.0 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 ARAS2.0 از مش‌بندی سیال در مرکز استفاده شده است که نمای ساده‌ای از این حجم‌بندی در شکل ۵ نشان داده شده است.

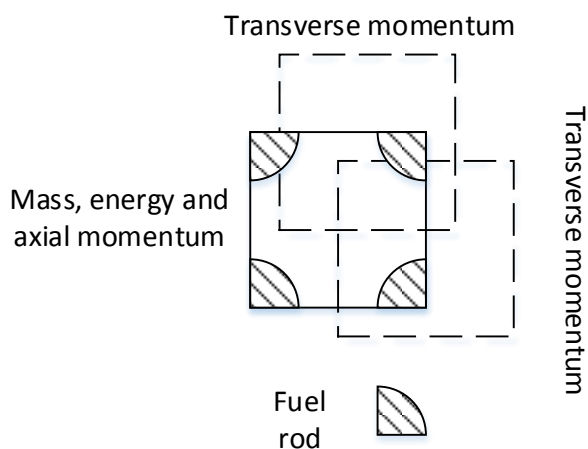


شکل ۵: نمونه مش‌بندی کانال‌های سیال در روش زیرکانال با رویکرد سیال در مرکز

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 ۶ نمایش داده شده است.

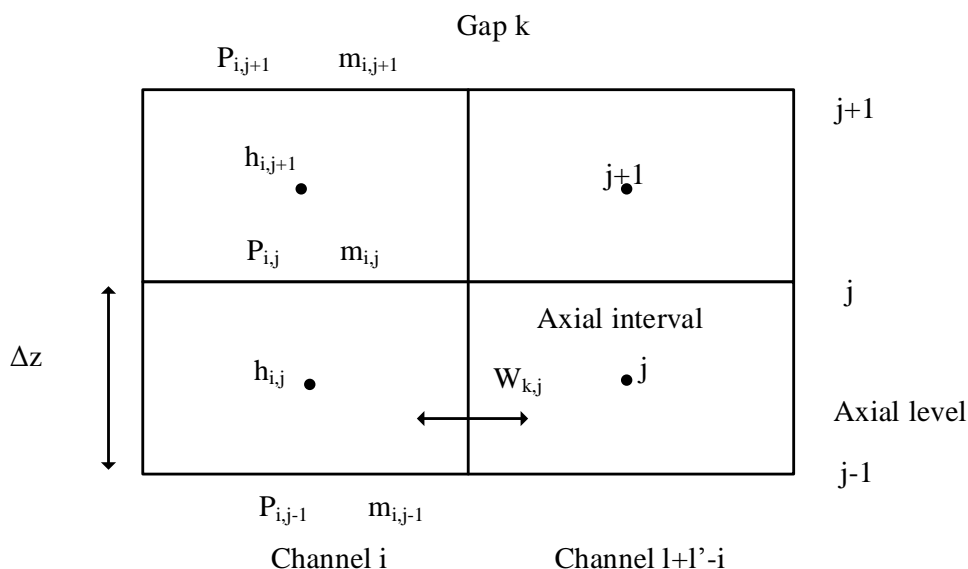
همانگونه که اشاره شد، تحلیل ترموهیدرولیکی در کد ARAS2.0 در یک آرایشی از کانال‌های موازی احاطه شده به وسیله میله‌های سوخت استوانه‌ای و فضاهای خالی انجام می‌شود. جهت محوری (محور Z) موازی با کانال‌ها فرض

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 ۷).



شکل ۶: 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 زام می‌باشد.



شکل ۷: حجم کنترل در نظر گرفته شده برای معادلات بقا (نمای جانبی)

برای یافتن شکل تفاضل محدود معادلات بقا مشتقات مکانی و زمانی به صورت گسسته شده نوشته می‌شوند. بدین ترتیب با در نظر گرفتن دو کانال مجاور و تقسیم‌بندی محوری این دو کانال مطابق با شکل ۷، برای حجم کنترل (i,j)، معادلات به صورت زیر گسسته خواهند شد:

• معادله بقای جرم

$$A_i \frac{\Delta X_j}{\Delta t} (\rho_{ij} - \rho_{ij}^n) + \dot{m}_{ij} - \dot{m}_{ij-1} + \Delta X_j \sum_{k \in i} e_{ik} w_{kj} = 0 \quad (15-6)$$

اولین سطح محوری برابر ۲ در نظر گرفته می‌شود که بر اساس آن، 1- j برابر ۱ و نشان‌دهنده ورودی جریان به کانال می‌باشد. همچنین معادلات ارائه شده به صورت کاملاً ضمنی و با تعریف پارامترهای وابسته در زمان‌های جدید نوشته شده‌اند. در این موارد برای سادگی اندیس n نشان‌دهنده زمان پیشین و سایر پارامترهای بدون اندیس n همگی در زمان جدید تعریف می‌گردند.

• معادله بقای انرژی

$$\frac{A_i}{\Delta t} [\rho_{ij} (h_{ij} - h_{ij}^n)] + \frac{1}{\Delta X_j} (\dot{m}_{ij} h_{ij}^* - \dot{m}_{ij-1} h_{ij-1}^*) + \sum_{k \in i} e_{ik} w_{kj} h_{kj}^* = \sum_{r \in i} P_r \Phi_{ir} q'_{rj} - \sum_{k \in i} w'_{kj} (h_{ij} - h_{kj}) - \sum_{k \in i} C_k s_k (T_{ij} - T_{kj}) + \sum_{r \in i} r_Q \Phi_{ir} q'_{rj} \quad (16-6)$$

در این رابطه:

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

$$h_{ij}^* = \begin{cases} h_{ij} & \dot{m}_{ij} > 0 \\ h_{ij+1} & \dot{m}_{ij} < 0 \end{cases} \quad (17-6)$$

همچنین:

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

$$h_{kj}^* = \begin{cases} h_{ij} & e_{ik} w_{kj} > 0 \\ h_{nj} & e_{ik} w_{kj} < 0 \end{cases} \quad (18-6)$$

• معادله بقای مومنتوم محوری

$$\frac{\Delta X_j}{\Delta t} (\dot{m}_{ij} - \dot{m}_{ij}^n) + \dot{m}_{ij} U'_{ij} - \dot{m}_{ij-1} U'_{ij-1} + \Delta X_j \sum_{k \in i} e_{ik} w_{kj} U_{kj}^* =$$

$$- A_i (P_{ij} - P_{ij-1}) - g A_i \Delta X_j \rho_{ij} \cos \theta - \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta X f \phi^2}{D_h \rho_l} \right)_{ij} \left| \dot{m}_{ij} \right| \frac{\dot{m}_{ij}}{A_i} - f_T \Delta X_j \sum_{k \in i} w'_{kj} (U'_{ij} - U'_{nj}) \quad (19-6)$$

بین دو کانال مجاور 1 و 1'، مقدار سرعت U_{kj}^* روی گپ k، به شکل زیر تعیین می‌گردد:

$$U_{kj}^* = \begin{cases} U'_{ij}, & e_{ik} w_{kj} > 0 \\ U'_{nj}, & e_{ik} w_{kj} < 0 \end{cases} \quad (20-6)$$

v' ، حجم مخصوص مؤثر که برابر است با:

$$v' = \frac{x^2}{\alpha \rho_v} + \frac{(1-x)^2}{(1-\alpha) \rho_l} \quad (21-6)$$

$$U' = \frac{\dot{m}}{A} v' \quad (22-6)$$

سایر پارامترها مشابه قبل تعریف می‌شوند.

• معادله بقای مومنتوم جانبی

$$\frac{\Delta z}{\Delta t} (w_{kj} - w_{kj}^n) + \bar{U}'_{kj} w_{kj}^* - \bar{U}'_{kj-1} w_{kj-1}^* = \frac{S_k}{l_k} \Delta z (P_l - P_l')_{j-1} - \frac{1}{2} \left(K_G \frac{\Delta z v'^*}{sl} \right)_{kj} |w_{kj}| w_{kj} \quad (23-6)$$

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

$$w_{kj}^* = \begin{cases} w_{kj}, & \bar{U}'_{kj} > 0 \\ w_{kj+1}, & \bar{U}'_{kj} < 0 \end{cases} \quad (24-6)$$

که در آن، \bar{U}'_{kj} سرعت متوسط سیال در فاصله k است. سرعت مومنتوم برای این مرز به وسیله سرعت‌های میانگین مومنتوم کانال 1 و 1' متصل به آن فرض شده است. در واقع:

$$\bar{U}'_{kj} = \frac{1}{2} (\bar{U}'_{lj} + \bar{U}'_{rj}) \quad (25-6)$$

روش حل عددی مورد استفاده برای معادلات ارائه شده شامل به دست آوردن معادله‌ای موسوم به معادله گرادیان فشار خواهد بود. برای به دست آوردن این معادله، ابتدا در معادله بقای مومنتوم جانبی (معادله (23-6))، جمله اختلاف فشار بین دو کانال مجاور تصحیح می‌گردد. بر این اساس، مقدار این جمله به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$(P_1 - P_{1'})_{j-1} = (P_1 - P_{1'})_j - \Delta z \left[\left(\frac{dp}{dz} \right)_{l,j} - \left(\frac{dp}{dz} \right)_{l',j} \right] \quad (26-6)$$

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

$$\left(\frac{dP}{dz} \right)_{ij} = -R_{ij} \dot{m}_{ij-1}^2 - g \rho_{ij} \cos \vartheta + \frac{\dot{m}_{ij}^n - \dot{m}_{i,j-1}}{A_i \Delta t} - \frac{1}{A_i} \sum_{k \in i} \left[e_{ik} w_{kj} u'_{kj} + f_T w'_{kj} (u'_{ij} - u'_{nj}) \right] \quad (27-6)$$

$$+ \left[2u'_{ij} + \frac{\Delta z}{\Delta t} + R_{ij} A_i \Delta z (\dot{m}_{ij} + \dot{m}_{ij-1}) \right] \left[\frac{1}{A_i} \sum_{k \in i} e_{ik} w_{kj} + \frac{\rho_{ij} - \rho_{ij}^n}{\Delta t} \right]$$

که در آن:

$$R_{ij} = \frac{1}{A_i^2} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{f_w \phi^2}{D_h \rho_1} + \frac{k'v'}{\Delta z} \right)_{ij} + \frac{v'_{ij} - v'_{ij-1}}{\Delta z_j} \right] \quad (28-6)$$

این روند محاسباتی تنها در مسائلی که جهت جریان سیال رو به بالا و مثبت است، قابل استفاده می‌باشد. بدین ترتیب با به دست آوردن جریان عرضی از معادله بقای مومنوم جانبی و قرار دادن آن در معادله گرادیان فشار، سیستم معادلات خطی بر حسب گرادیان فشار به دست می‌آید. با در نظر گرفتن همه کانال‌ها، ماتریس به دست آمده به صورت یک ماتریس که سه قطر آن غیر صفر است، خواهد بود که با روش‌های مناسب حل می‌گردد.

$$\left(\frac{dP}{dz} \right)_{ij} = -R_{ij} \dot{m}_{ij-1}^2 - g \rho_{ij} \cos \vartheta + \left[2u'_{ij} + \frac{\Delta z}{\Delta t} + R_{ij} A_i \Delta z (\dot{m}_{ij} + \dot{m}_{ij-1}) \right] \left[\frac{\rho_{ij} - \rho_{ij}^n}{\Delta t} \right] \quad (29-6)$$

$$- \frac{1}{A_i} \sum_{k \in i} f_T w'_{kj} (u'_{ij} - u'_{nj}) + \frac{\dot{m}_{ij}^n - \dot{m}_{i,j-1}}{A_i \Delta t} \left[u'_{kj} - 2u'_{ij} - \frac{\Delta z}{\Delta t} - R_{ij} A_i \Delta z (\dot{m}_{ij} + \dot{m}_{ij-1}) \right] e_{ik} w_{kj} - \frac{1}{A_i} \sum_{k \in i} e_{ik} w_{kj}$$

که می‌توان در شکل ساده و با مرتب کردن جملات، این معادله را به صورت زیر نوشت:

$$\left(\frac{dP}{dz} \right)_{ij} = D_{ij} - \sum_{k \in i} C_{ij} e_{ik} w_{kj} \quad (30-6)$$

که در آن:

$$D_{ij} = -R_{ij}\dot{m}_{ij-1}^2 - g\rho_{ij}\cos\theta + \left[2u'_{ij} + \frac{\Delta z}{\Delta t} + R_{ij}A_i\Delta z(\dot{m}_{ij} + \dot{m}_{ij-1}) \right] \left[\frac{\rho_{ij} - \rho_{ij}^n}{\Delta t} \right] - \frac{1}{A_i} \sum_{k \in i} f_T w'_{kj} (u'_{ij} - u'_{nj}) + \frac{\dot{m}_{ij}^n - \dot{m}_{i,j-1}}{A_i \Delta t}$$

۹

$$C_{ij} = \frac{1}{A} \left[u'^*_{kj} - 2u'_{ij} - \frac{\Delta z}{\Delta t} - R_{ij}A_i\Delta z(\dot{m}_{ij} + \dot{m}_{ij-1}) \right]$$

بنابراین با در نظر گرفتن رابطه (۶-۲۳) و ساده‌سازی و نوشتن مقدار جریان عرضی بر حسب پارامترهای معادله و قرار دادن آن در رابطه فوق می‌توان نوشت:

$$\left(\frac{dP}{dz} \right)_{ij} = D_{ij} - \left(\sum_{k \in i} C_{ij} e_{ik} \frac{\left(\frac{\Delta z}{\Delta t} w^n_{kj} \right) - \bar{U}'_{kj-1} w^*_{kj-1} + \frac{S_k}{I_k} \Delta z (P_1 - P_1)_{j-1}}{\left(\frac{\Delta z}{\Delta t} + \bar{U}'_{kj} - \frac{1}{2} \left(K_G \frac{\Delta z v'^*}{sl} \right)_{kj} \right) |w_{kj}|} \right) \quad (۶-۳۱)$$

از طرف دیگر با جایگزین کردن مقدار اختلاف فشار (جمله $(P_1 - P_1)_{j-1}$)، با استفاده از رابطه (۶-۲۶) شکل ماتریسی معادله مورد نظر برای محاسبه گرادیان فشار در هر کانال به دست می‌آید:

$$[M_j] \left\{ \left(\frac{dP}{dz} \right)_j \right\} = \{b_j\} \quad (۶-۳۲)$$

در این معادله، M 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 فشار، فشار در تمامی مقاطع طولی محاسبه می‌گردد.

$$P_{ij} = P_{i,j-1} + \Delta z \left(\frac{\Delta P}{\Delta z} \right)_{i,j} \quad (۶-۳۳)$$

۴-۶- 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 ARAS2.0 توصیف شده است.

۴-۶-۱- روابط محاسبه افت فشار اصطکاکی تک فاز

در سمت راست معادله بقای مومنتوم، معادله (۶-۱۳)، جمله افت فشار اصطکاکی ظاهر می‌شود. در حالت کلی برای تخمین افت فشار اصطکاکی می‌توان نوشت [۳]:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial z}\right)_{\text{friction}} = \frac{f_w}{2D} \rho \{v\}^2 \quad (۶-۳۴)$$

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

$$f_w = \begin{cases} 0.32 \frac{1}{\text{Re}^{0.25}} & \text{Re} < 2000 \\ 64 \frac{1}{\text{Re}} & \text{Re} > 2000 \end{cases} \quad (۶-۳۵)$$

که در آن Re عدد رینولدز می‌باشد.

۴-۶-۲- 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 دوفازی به افت فشار جریان 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:

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{\text{fric}}^{\text{TP}} = \phi_{f_0}^2 \left(\frac{dP}{dz}\right)_{\text{fric}}^{f_0} \quad (36-6)$$

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 [۴]:

$$\Phi^2 = 12.83 \left[\frac{\rho_l}{\rho_g} - 1 \right] G^{-0.45} x^{0.824} + 1 \quad (37-6)$$

در این رابطه، G ، شار جرمی سیال ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$) و x ، کیفیت غیر تعادلی بخار است.

۳-۴-۶- 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 (۳۸-۶) بدست می‌آید:

$$x = \frac{h - h_f}{h_v - h_f} \quad (38-6)$$

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 [۱]:

$$\begin{cases} x = x_e - x_d \exp\left(\frac{x_e}{x_d} - 1\right) & x_e \geq x_d \\ x = 0 & x_e < x_d \end{cases} \quad (39-6)$$

که در آن:

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

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

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

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

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

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

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

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

در روابط فوق:

x_e : کیفیت تعادلی بخار

C_p : ظرفیت حرارتی ویژه (kJ/kg.K)

σ : کشش سطحی (N/m)

ν_f : حجم مخصوص مایع اشباع (m³/kg)

f: ضریب اصطکاک سیال

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

۶-۴-۴- 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:

$$\alpha = \frac{xv_g}{S(1-x)v_f + xv_g} \quad (۴۰-۶)$$

بنابراین در صورتی که نسبت لغزش مخالف یک در نظر گرفته شود، مقدار پارامتر S از رابطه اسمیت^۱، (۴۱-۶)، به دست می‌آید:

$$S = 0.4 + 0.6 \left[\frac{0.4 + x \left(\frac{v_g}{v_f} - 0.4 \right)}{0.4 + 0.6x} \right] \quad (۴۱-۶)$$

۶-۴-۵- دبی جرمی جریان عرضی متلاطم

همانگونه که پیش‌تر اشاره شد، 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 ARAS2.0 روابط گوناگونی برای محاسبه این پارامتر استفاده شده است که این روابط عبارتند از [۱]:

$$w'_k = a s_k G_k \quad (۴۲-۶)$$

$$w'_k = a Re^b s_k G_k \quad (۴۳-۶)$$

$$w'_k = a s_k Re^b D_k G_k \quad (۴۴-۶)$$

^۱ Smith

$$w'_k = a \frac{S_k}{1} \text{Re}^b D_k G_k \quad (45-6)$$

در این روابط، a ، ضریب به کار رفته برای محاسبه ضریب اصطکاک که برای جریان ناآرام برابر $0/32$ و در جریان آرام برابر 64 است در حالیکه b برای این دو رژیم جریان به ترتیب برابر با $0/25$ و -1 می‌باشد. همچنین Re ، عدد رینولدز:

$$\text{Re}_k = \frac{G_k D_k}{\mu_k} \quad (46-6)$$

D_k : قطر هیدرولیکی که به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$D_k = \frac{4(A_1 + A_{1'})}{(P_1 + P_{1'})} \quad (47-6)$$

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 تأثیر 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 خنک کننده 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:

$$(\rho C_p) \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (K \nabla T) + q''' = 0 \quad (2-7)$$

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 ARAS2.0، خواص سوخت و غلاف هم به صورت ثابت و هم 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:

$$q = hA(T_w - T_f) \quad (3-7)$$

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 [۵]:

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

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.

^۱Dittus-Boelter

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 [۶]:

$$h_{conv_{TP}} = h_c + h_{NB} \quad (7-7)$$

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

$$h_c = F \frac{0.023k}{D} \left[\frac{\rho V(1-x)D}{\mu} \right]^{0.8} \left[\frac{C_p \mu}{k} \right]^{0.4} \quad (8-7)$$

در این رابطه F برابر است با:

$$F = 2.35 \times (X_{tt}^{-1} + 0.213)^{0.736}, X_{tt}^{-1} = \left(\frac{x}{(1-x)} \right)^{0.9} \left(\frac{\rho_f}{\rho_g} \right)^{0.5} \left(\frac{\mu_g}{\mu_f} \right)^{0.1} \quad (9-7)$$

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

$$h_{NB} = 0.00122 \left[\frac{k^{0.79} C_p^{0.45} \rho^{0.49} g^{0.25}}{\sigma^{0.5} \mu^{0.29} h_{fg}^{0.24} \rho_g^{0.24}} \right] (T_{wall} - T_{sat})^{0.24} \quad (10-7)$$

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

$$S = \begin{cases} (1 + 0.12 Re_{TP})^{-1.14}, & Re_{TP} < 32.5 \\ (1 + 0.42 Re_{TP}^{0.78})^{-1}, & 32.5 \leq Re_{TP} < 70 \\ 0.0797, & Re_{TP} \geq 70 \end{cases} \quad (11-7)$$

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

¹ Saturated boiling

² Chen

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 (۷-۱۱) 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 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 ARAS2.0 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^۲، برای محاسبه ضریب انتقال حرارت استفاده خواهد شد که در این مدل، ضریب انتقال حرارت گپ، با کسر مولی گازها، دما و فشار گاز 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 شکاف گازی 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 و تغییر ضریب هدایت حرارتی مخلوط گاز متفاوت خواهد بود. در چنین حالتی، ضریب انتقال حرارت گپ به صورت زیر قابل بیان خواهد بود:

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

¹ Suppression factor

² Calza-Bini

در این رابطه، $h_{g.open}$ ضریب انتقال حرارت گپ در جایی که غلاف به سوخت نجسییده 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:

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

ضریب هدایت حرارتی هر یک 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 داخلی غلاف و دمای سطح خارجی سوخت به ترتیب T_{ci} و T_{fo} 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	۰/۰۰۲۶۳۹	۰/۷۰۸۵
۲	Argon	۰/۰۰۰۲۹۸۶	۰/۷۷۲۴
۳	Krypton	۰/۰۰۰۰۸۲۴۷	۰/۸۳۶۳
۴	Xenon	۰/۰۰۰۰۴۳۵۱	۰/۸۶۱۶
۵	Hydrogen	۰/۰۰۱۰۹۷	۰/۸۷۸۵
۶	Nitrogen	۰/۰۰۰۵۳۱۴	۰/۶۸۹۸
۷	Oxygen	۰/۰۰۰۱۸۵۳	۰/۸۷۲۹

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

$$\delta_{eff} = \delta_{gap} + \delta_{jump1} + \delta_{jump2} \quad (۱۸-۷)$$

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

$$\delta_{jump1} + \delta_{jump2} = \frac{0.024688 \text{ kg } T_g^{0.5}}{P_g \sum_i f_i a_i M_i^{-0.5}} \quad (۱۹-۷)$$

که در آن M_i جرم اتمی گاز و a_i برابر خواهد بود با:

$$a_i = a_{He} + \frac{(M_i - M_{He})}{(M_{Xe} - M_{He})} (a_{Xe} - a_{He}) \quad (۲۰-۷)$$

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

$$a_{He} = 0.425 - 2.3 \times 10^{-4} T_g \quad (۲۱-۷)$$

$$a_{Xe} = 0.740 - 2.5 \times 10^{-4} T_g \quad (۲۲-۷)$$

σ : ثابت استفان-بولتزمن، که مقدار آن $5/67 \times 10^{-8} \text{ (W/m}^2\text{K}^4)$ 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:

$$\epsilon_f = 0.86 \quad (۲۳-۷)$$

$$\epsilon_c = 0.3256 + 1.24 \times 10^5 d_{ox} \quad (۲۴-۷)$$

d_{ox} در سوخت تازه برابر با صفر است. همچنین $h_{g,contact}$ ضریب انتقال حرارت شکاف گازی در جایی است که سوخت

به غلاف چسبیده است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

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

که در آن C ، مقدار ثابت برابر با $10 \text{ (ft}^{-1/2}\text{)}$ است. k_c و k_f 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 بر حسب مدل EPRI، عبارت است از:

$$q_{\text{CHF}}'' = \frac{1}{0.0036} \frac{AF_A - x_{\text{in}}}{CF_C F_g F_{\text{nu}} + \left(\frac{h - h_{\text{in}}}{0.0036q'' h_{\text{fg}}} \right)} \quad (26-7)$$

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

$$C = 1.615 I P_r^{1.4066} (0.0036G)^{(-0.4843-2.0749P_r)}$$

در رابطه (۷-۲۶)، 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:

$$F_g = 1.3 - 0.3k_g \quad (27-7)$$

که در آن، K_g 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.

۷-۵- شبکه‌بندی و گسسته‌سازی معادلات سوخت

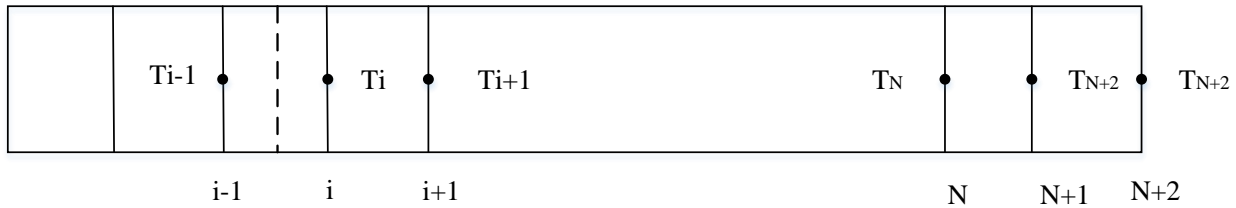
همانگونه که اشاره شد هر یک از کانال‌های جریان سیال به وسیله تعدادی میله سوخت در هر مجتمع احاطه می‌گردد. به عنوان مثال در آرایش مثلثی هر کانال سیال با سه میله سوخت و در آرایش چهار وجهی با چهار میله سوخت در ارتباط خواهد بود. بدین ترتیب در حالت پایا تمام گرمای تولید شده در میله‌های سوخت به خنک‌کننده منتقل 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 ARAS2.0 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 ۸ با i نشان داده شده است تعیین می‌گردد در حالیکه خواص مواد در مرکز هر حجم محاسبه می‌شود.

Properties

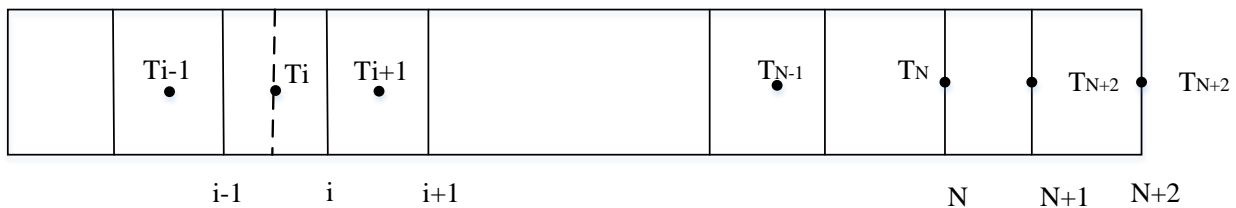
$i-1/2$



شکل ۸: حجم‌بندی میله سوخت در راستای شعاعی (مدل اول)

در مدل دوم برای گسسته‌سازی، 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 ۹).

Properties



شکل ۹: 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:

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_{i-1}} + k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_i} = q''' V_i \quad (28-7)$$

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

$$\bar{r}_i = \frac{1}{\pi(r_i^2 - r_{i-1}^2)} \int_{r_{i-1}}^{r_i} 2\pi r r dr = \frac{2}{3} \frac{r_i^2 + r_{i-1}^2 + r_i r_{i-1}}{r_i + r_{i-1}} \quad (29-7)$$

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:

$$h_n = \frac{\sum_{l \in n} \Phi_{nl} h_{nl}}{\sum_{l \in n} \Phi_{nl}} \quad (30-7)$$

$$T_b = \frac{\sum_{l \in n} \Phi_{nl} h_{nl} T_{bl}}{\sum_{l \in n} \Phi_{nl} h_{nl}} \quad (31-7)$$

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. 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:

$$\bar{A}T = b \quad (32-7)$$

که در آن A ماتریس مربعی سه قطری ضرایب، b بردار جواب و T بردار دمایی به شکل $T = [T_1, T_2, \dots, T_1]^T$ است. این دستگاه معادلات، پس از محاسبه ضریب انتقال حرارت جابجایی 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.

در انتها بایستی اشاره شود که در گسسته‌سازی و حل معادلات فرض می‌شود که بتوان فواصل محوری در طول میله سوخت را غیریکسان وارد نمود. در این حالت این فواصل طولی برای تمام میله‌ها یکسان می‌باشد. هرچند، همانند قبل هر فاصله محوری در کانال متناظر با یک فاصله محوری در میله سوخت است.

۸- شرایط مرزی و اولیه

همانند تمام مسائل مشابه، برای حل دستگاه معادلات به دست آمده برای سیال لازم است شرایط مرزی تعیین گردد. با توجه به اینکه کد ARAS2.0 محاسبات حالت گذرا را در نظر می‌گیرد، مسئله به شرایط اولیه نیاز دارد. بر این اساس شرایط اولیه مسئله با توجه به حالت گذرای مورد نظر در فایل ورودی کد تعیین می‌گردد. این موارد شامل تغییرات پارامترهای دبی، توان تولیدی در میله‌های سوخت، دمای سیال ورودی و فشار در خروجی کانال می‌باشد. از طرف دیگر 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 و اولیه 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 (T_{if}) انتقال حرارت صورت نگیرد. بنابراین برای این سطح خواهیم داشت:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_{if}} = 0 \quad (1-8)$$

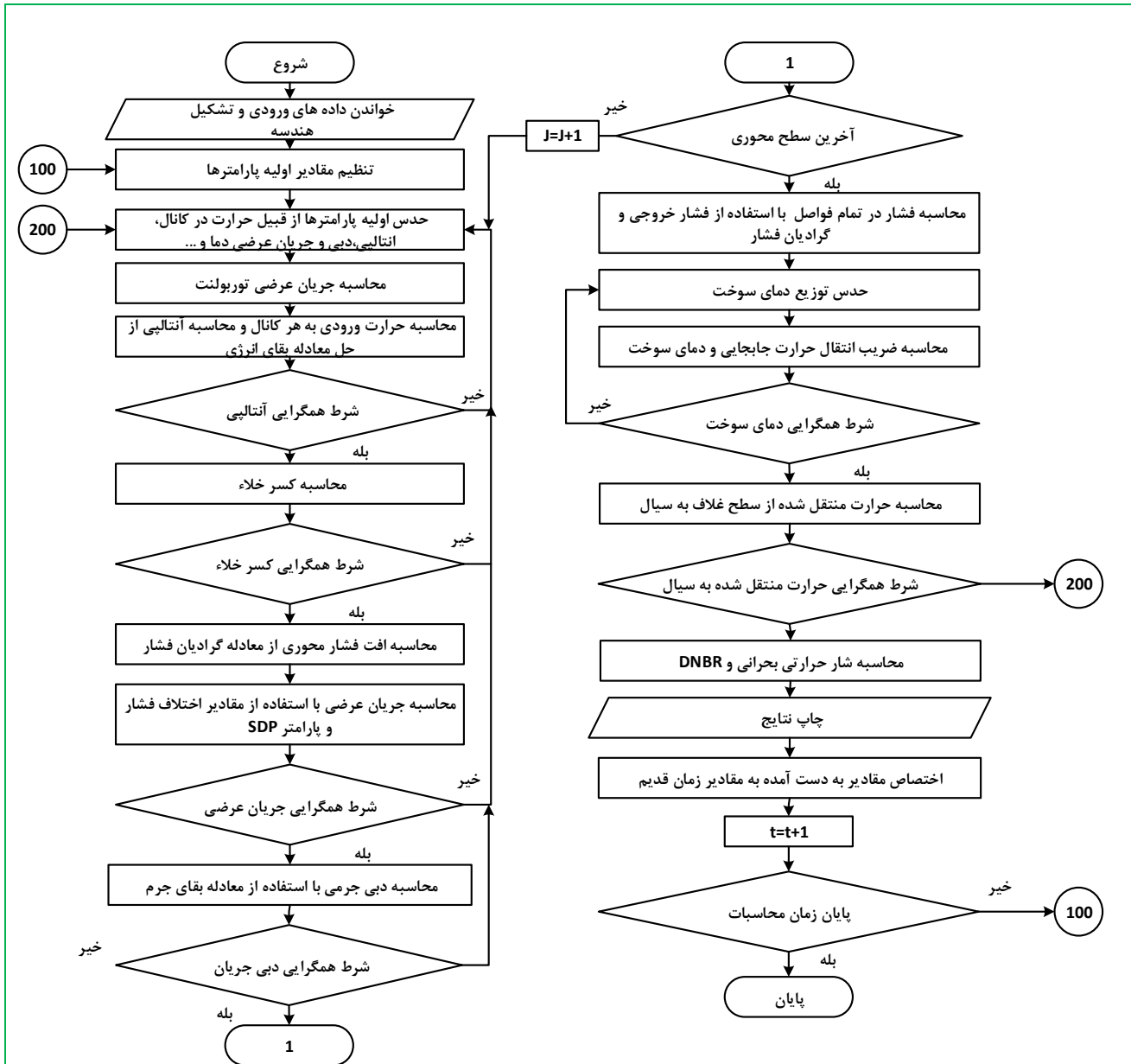
دومین شرط مرزی مربوط به سطح خارجی میله سوخت است. در سطح خارجی میله سوخت (r_{coc})، یعنی سطح تماس غلاف با خنک‌کننده انتقال حرارت جابه‌جایی صورت می‌گیرد. در این حالت حرارتی که از سطح رسانش می‌شود برابر حرارت جابه‌جا شده با خارج است:

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{r=r_{coc}} = h(T_{coc} - T_b) \quad (2-8)$$

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.

۹- توصیف الگوریتم محاسباتی

بدین منظور محاسبات از حالت پایا شروع شده و سپس با استفاده از مقادیر به دست آمده در این حالت به عنوان شرایط اولیه مسئله معادلات به صورت وابسته به زمان حل می‌گردند. با این وجود روند محاسباتی برای هر دو حالت پایا و گذرا یکسان بوده و تنها در بازه زمانی اول برای شرایط پایا جملات مشتق زمانی با در نظر گرفتن یک مقدار بسیار بزرگ برای بازه زمانی ($\Delta t = 10^{-20}$ s) برابر صفر خواهد بود. همچنین به عنوان حدس اولیه پارامترها و به منظور جلوگیری از خارج شدن جواب‌ها از محدوده شعاع همگرایی از مقادیر به دست آمده در یک بازه‌ی زمانی قبل‌تر استفاده می‌شود. علاوه بر این با توجه به تاخیر زمانی ایجاد شده میان حرارت تولید شده در سوخت و حرارت منتقل شده به سیال، بایستی روند مناسبی برای همبسته‌سازی معادلات سیال و سوخت در نظر گرفت که این مورد به همراه سایر بخش‌های محاسباتی در روندنمای نمایش داده شده در شکل ۱۰ توصیف گردیده است. در محاسبه پارامترهای ترموهیدرولیکی سیال از کتابخانه خواص ترمودینامیکی IF97 استفاده شده است [۹].



شکل ۱۰: روند نمای حل معادلات سیال و سوخت در کد ARAS2.0

۱۰- اعتبارسنجی نتایج

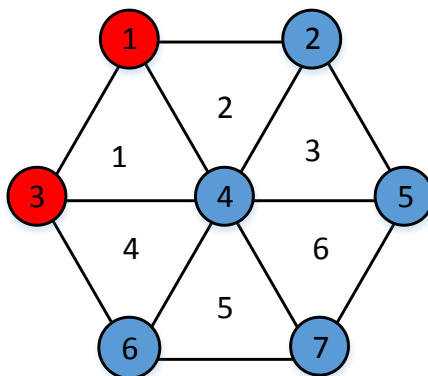
پس از توصیف روند محاسباتی مورد استفاده در کد ARAS2.0، در این بخش به منظور تعیین صحت محاسبات، تعدادی مسئله در نظر گرفته شده و برای هر یک از آنها نتایج به دست آمده در حالت پایا و گذرا برای پارامترهای سیال و میله سوخت با نتایج به دست آمده از کد COBRA-EN مقایسه گردیده است. کلیات مسائل در نظر گرفته شده در جدول شماره ۲ شرح داده شده است.

جدول شماره ۲: مشخصات مسائل منتخب

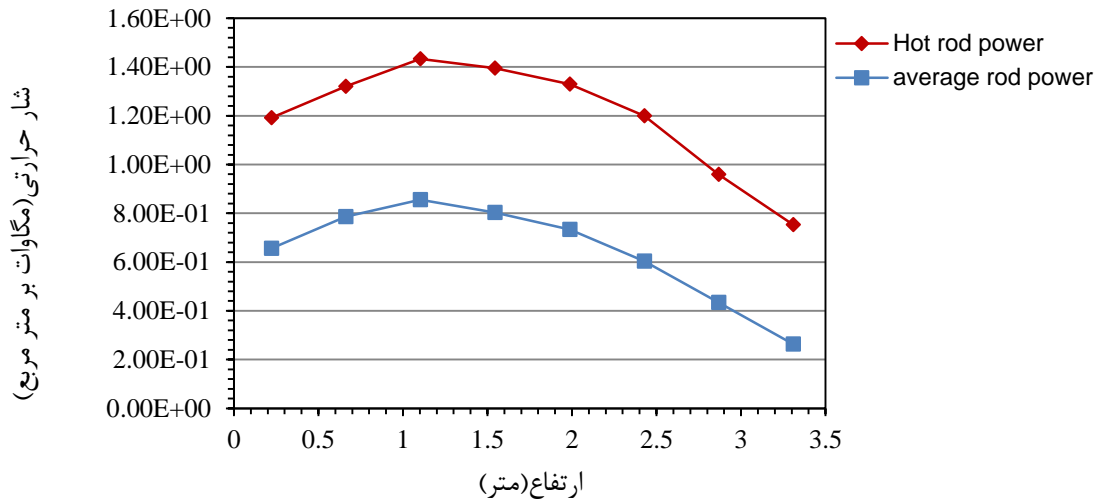
شماره مسئله	آرایش میله سوخت	تعداد کانال‌ها	نوع حالت گذرا
۱	شش‌وجهی	۶	کاهش دبی جریان ورودی
۲	چهاروجهی	۱۶	افزایش توان تولیدی در سوخت
۳	شش‌وجهی	۶۰۰	کاهش فشار خروجی
۴	چهاروجهی	۴	کاهش درجه حرارت مادون‌سرد جریان سیال ورودی
۵	شش‌وجهی	۲۴	تلفیقی (تغییر دبی جریان، توان تولیدی و فشار خروجی)

۱۰-۱- مسئله شماره ۱

اولین مسئله در نظر گرفته شده برای محاسبات، آرایه‌ای متشکل از هفت میله سوخت به صورت شش‌وجهی خواهد بود که نمایش ساده‌ای از آن در شکل ۱۱ 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 (۳) باشند. از طرف دیگر، توان اعمالی به تمام میله‌های سوخت به جز میله‌های شماره ۱ و ۳ به صورت یکسان اعمال شده است. برای بررسی حالت گذرای مسئله و امکان مقایسه بهتر فرض شده است که توزیع توان محوری به صورت توزیع کسینوسی نامتقارن بوده و برای میله‌های شماره ۱ و ۳ مقدار بیشتری نسبت به سایر میله‌ها در نظر گرفته شده است. توزیع توان برای این آرایش در شکل ۱۲ نشان داده شده است. در این مسئله همچنین فرض شده است که تمامی فواصل محوری یکسان باشد.



شکل ۱۱: آرایش میله‌ها و کانال‌ها در مسئله شماره ۱

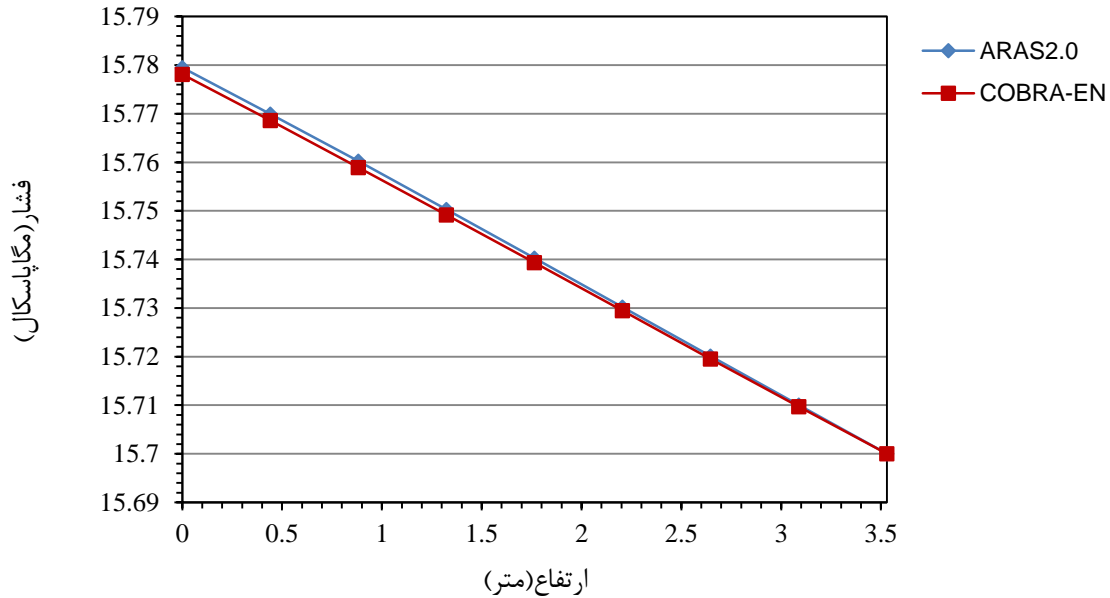


شکل ۱۲: توزیع محوری شار حرارتی در میله‌های داغ و با توان متوسط

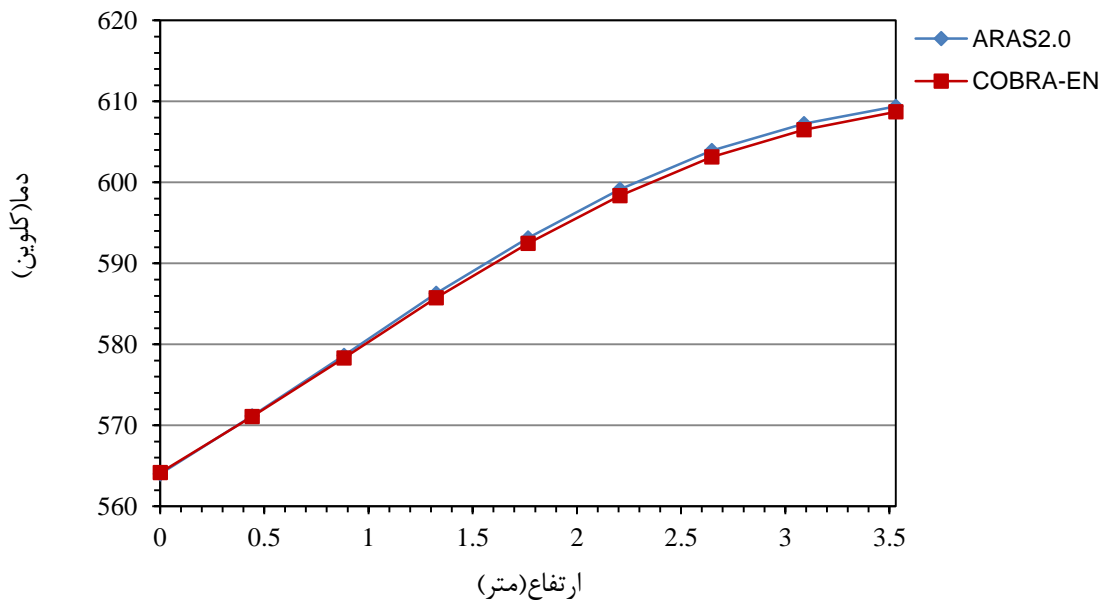
جدول شماره ۳: مشخصات مسئله شماره ۱

شماره	پارامتر	مقدار
۱	دبی جرمی ورودی به هر کانال (کیلوگرم بر ثانیه)	۰/۱۴۹۸۲
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)	۰/۰۰۷۵۷
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	اندازه گام (متر)	۰/۰۱۲۷۵
۱۶	طول میله سوخت (متر)	۳/۵۳

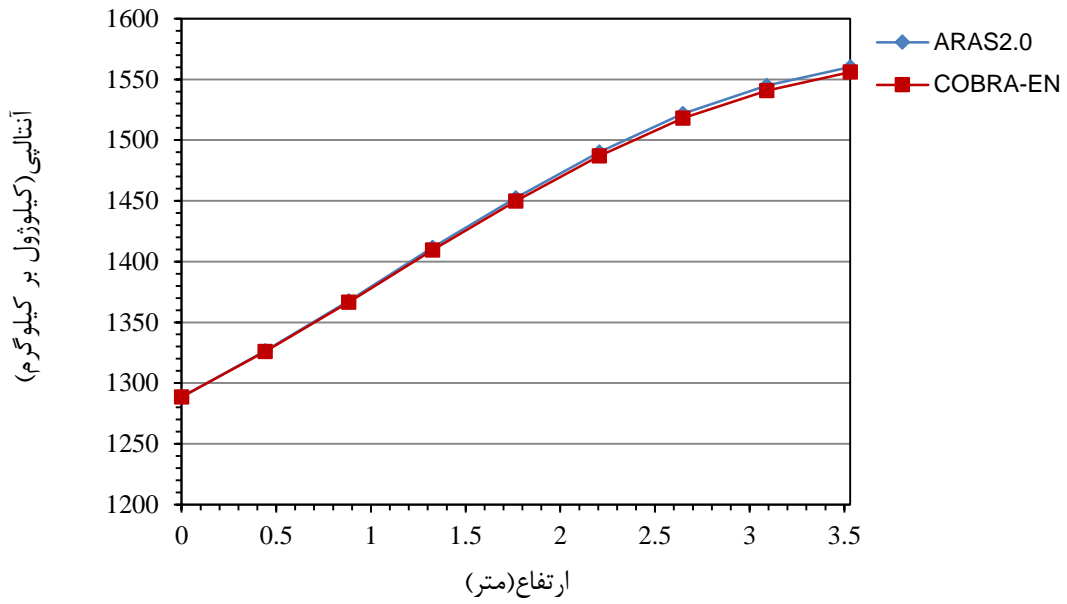
در چنین سیستمی نتایج حاصل از اجرای برنامه توسعه داده شده ARAS2.0، در حالت پایا با نتایج مدل‌سازی مشابه در کد تجاری COBRA-EN مقایسه شده که نمودارهای مربوط به آن در شکل‌های ۱۳ تا ۱۹ نمایش داده شده است. در این سیستم در حالت پایا جریان به صورت تک‌فازی خواهد بود.



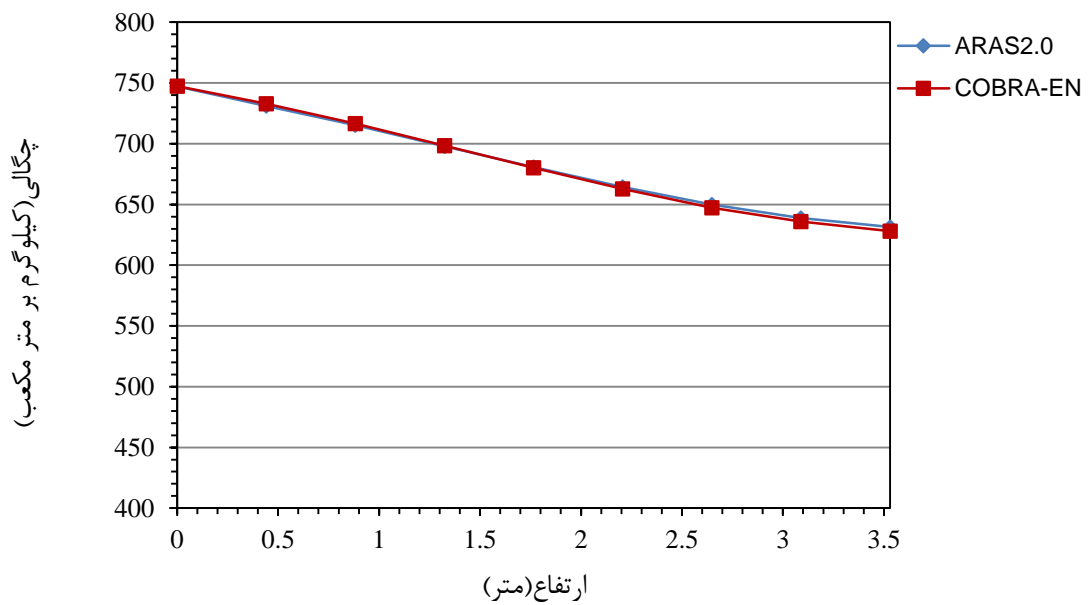
شکل ۱۳: توزیع محوری فشار برای کانال شماره ۱ (کانال داغ)



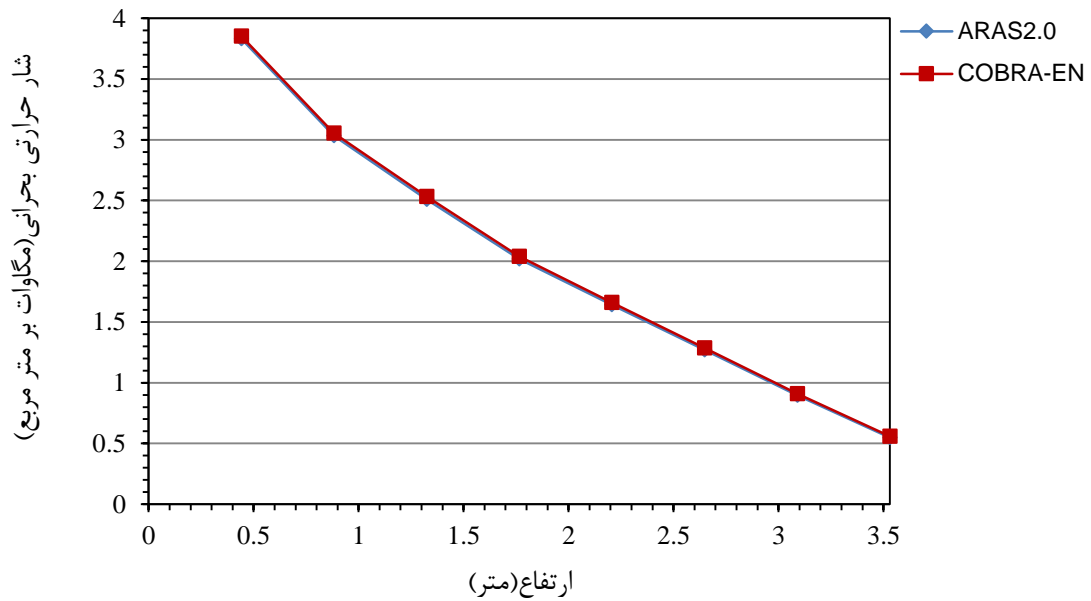
شکل ۱۴: توزیع محوری دمای سیال برای کانال شماره ۱ (کانال داغ)



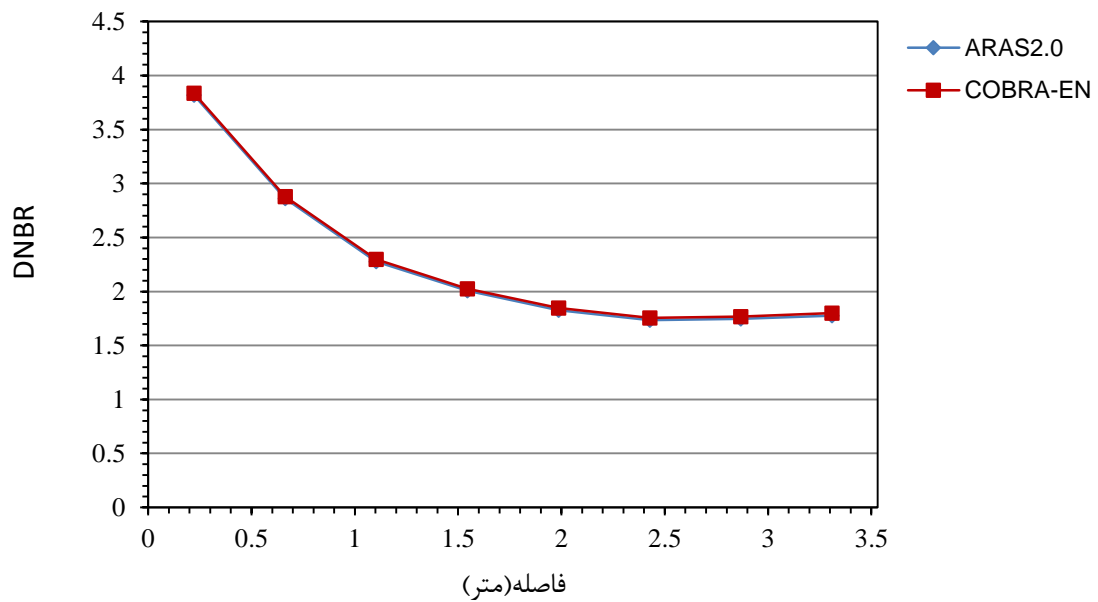
شکل ۱۵: توزیع محوری آنتالپی سیال برای کانال شماره ۱ (کانال داغ)



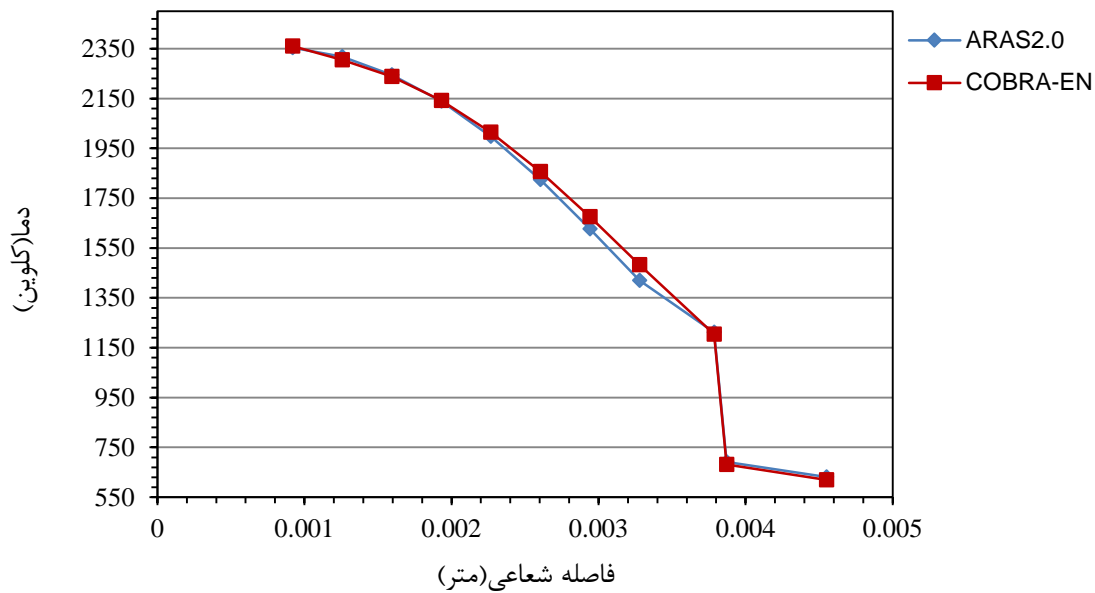
شکل ۱۶: توزیع محوری چگالی سیال برای کانال شماره ۱ (کانال داغ)



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

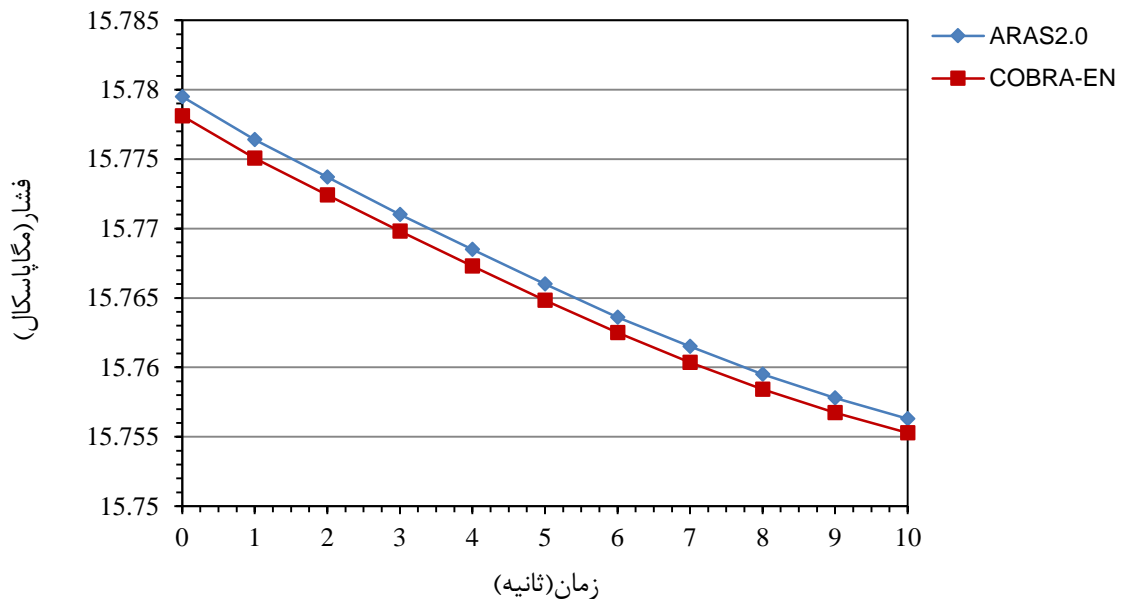


شکل ۱۸: توزیع محوری DNBR برای میله داغ

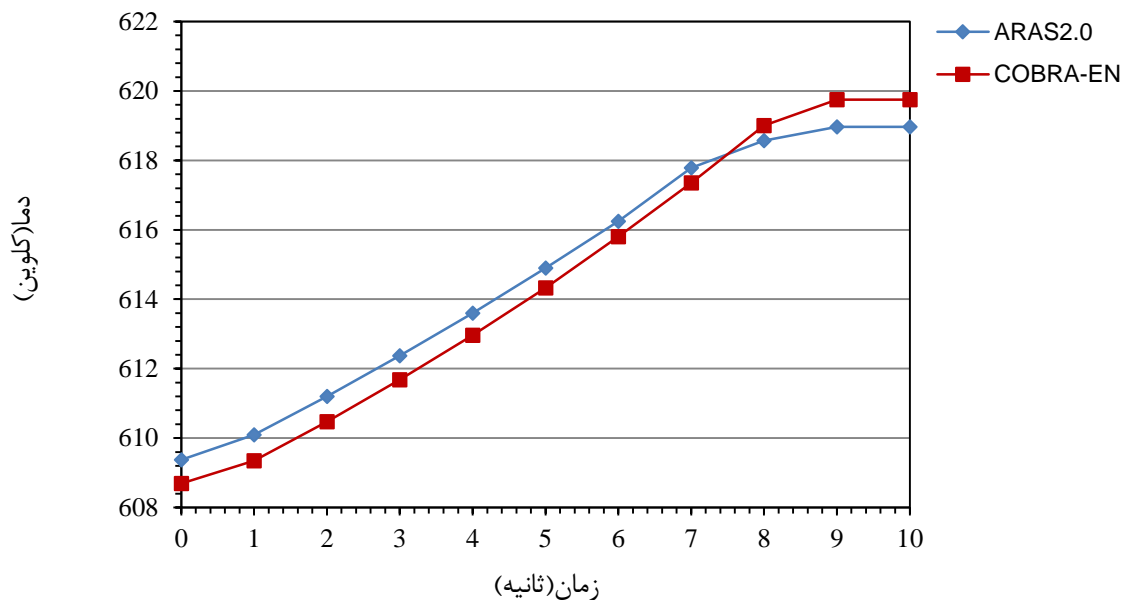


شکل ۱۹: توزیع شعاعی بیشینه دمای سوخت برای میله داغ

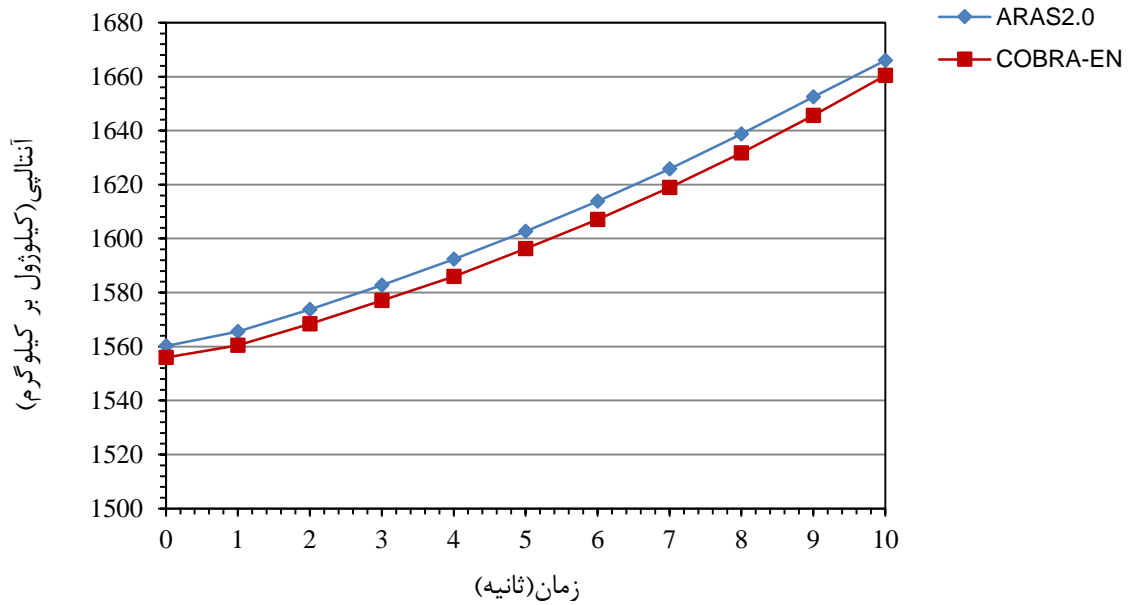
همانگونه که ملاحظه می‌شود، در محاسبات توزیع دمایی در میله سوخت، در آخرین گره در سوخت یک کاهش محسوس نسبت به گره‌های پیشین به وجود می‌آید. علت این کاهش به دلیل روش محاسبه ضریب هدایت حرارتی بین دو گره است. که با توجه به مش‌بندی گره آخر و شعاع متوسط حجمی تعریف شده برای این حجم که فاصله بیشتری نسبت به بقیه فواصل دارد، گرادیان دما کمتر و در نتیجه کاهش دما بیشتر است. سایر نتایج در حالت پایا در این بخش تطابق مناسبی با نتایج به دست آمده از کد COBRA-EN دارند. به منظور بررسی حالت گذرا در این مسئله فرض می‌شود که دبی جریان ورودی به سیستم در مدت زمان ۱۰ ثانیه به ۰/۷ مقدار اولیه خود برسد. در این حالت نتایج پارامترهای مورد نظر سیال و سوخت بر حسب زمان به صورت نمودارهای رسم شده در شکل‌های ۲۰ تا ۲۹ به دست آمده است. این نتایج همگی مجدداً برای کانال داغ (شماره ۱) و میله داغ (شماره ۱ یا ۳) نمایش داده شده است.



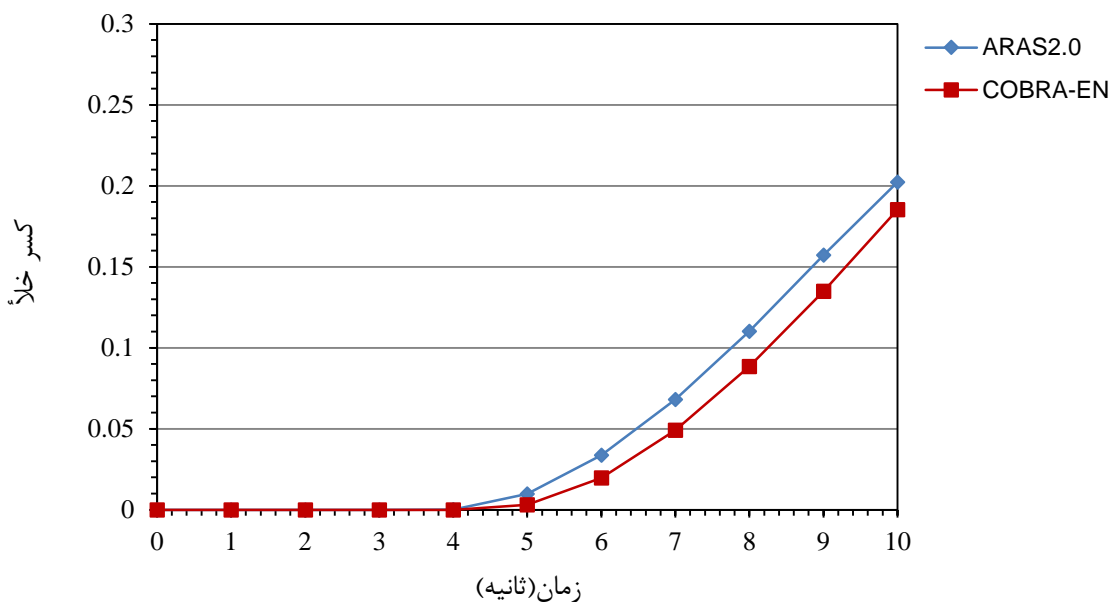
شکل ۲۰: تغییرات زمانی فشار در ورودی برای کانال شماره ۱ (کانال داغ)



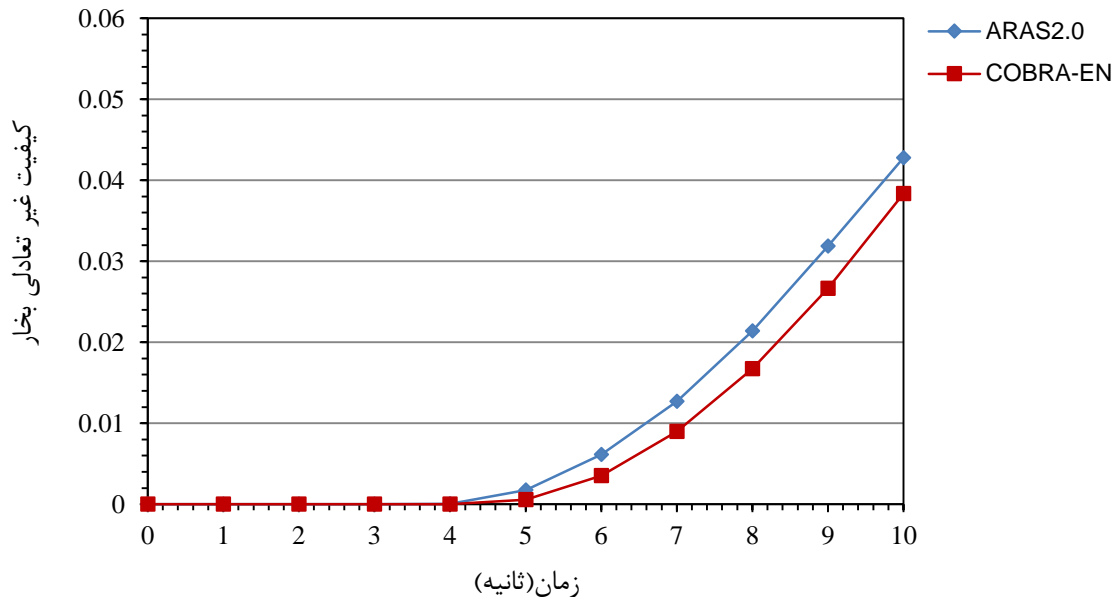
شکل ۲۱: تغییرات زمانی دمای سیال در خروجی برای کانال شماره ۱ (کانال داغ)



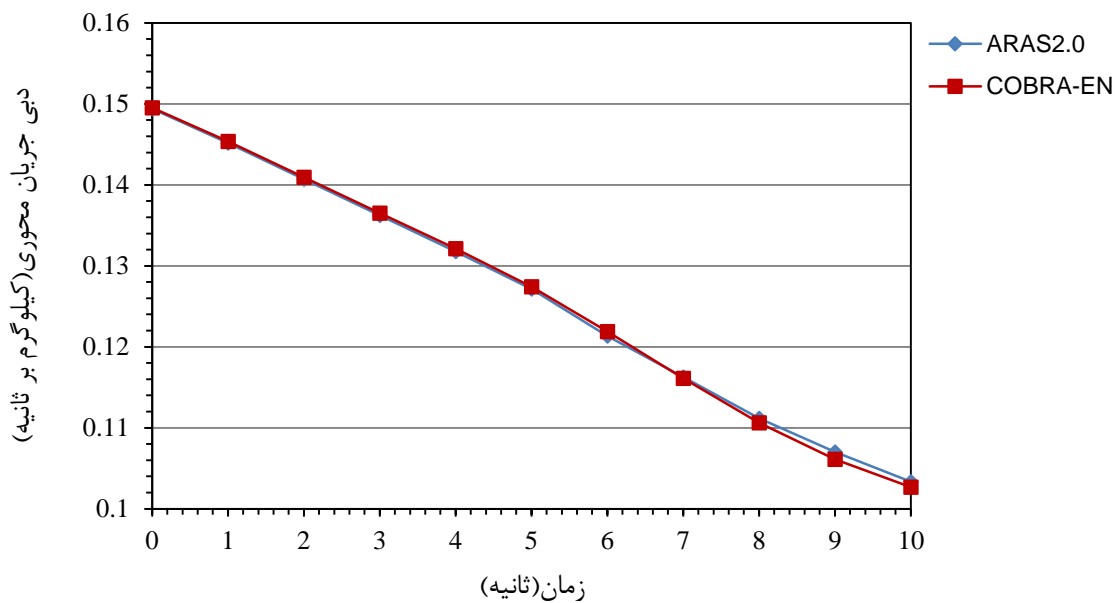
شکل ۲۲: تغییرات زمانی آنتالیپی سیال در خروجی برای کانال شماره ۱ (کانال داغ)



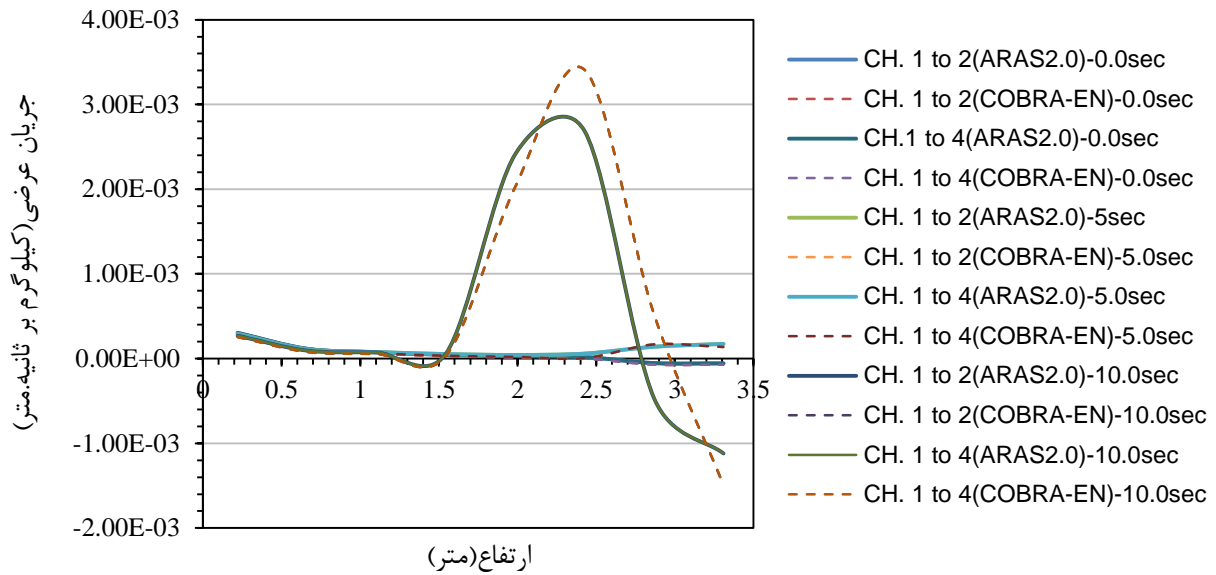
شکل ۲۳: تغییرات زمانی کسر خلأ سیال در خروجی برای کانال شماره ۱ (کانال داغ)



شکل ۲۴: تغییرات زمانی کیفیت غیر تعادلی بخار سیال در خروجی برای کانال شماره ۱ (کانال داغ)

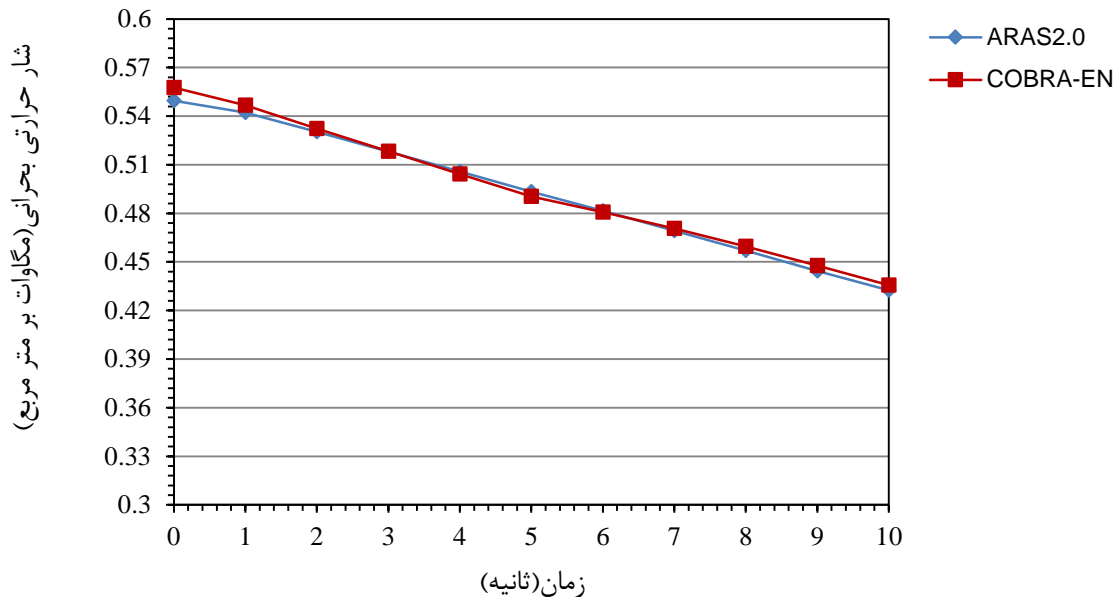


شکل ۲۵: تغییرات زمانی دبی جریان محوری سیال در خروجی کانال داغ (کانال شماره ۱)

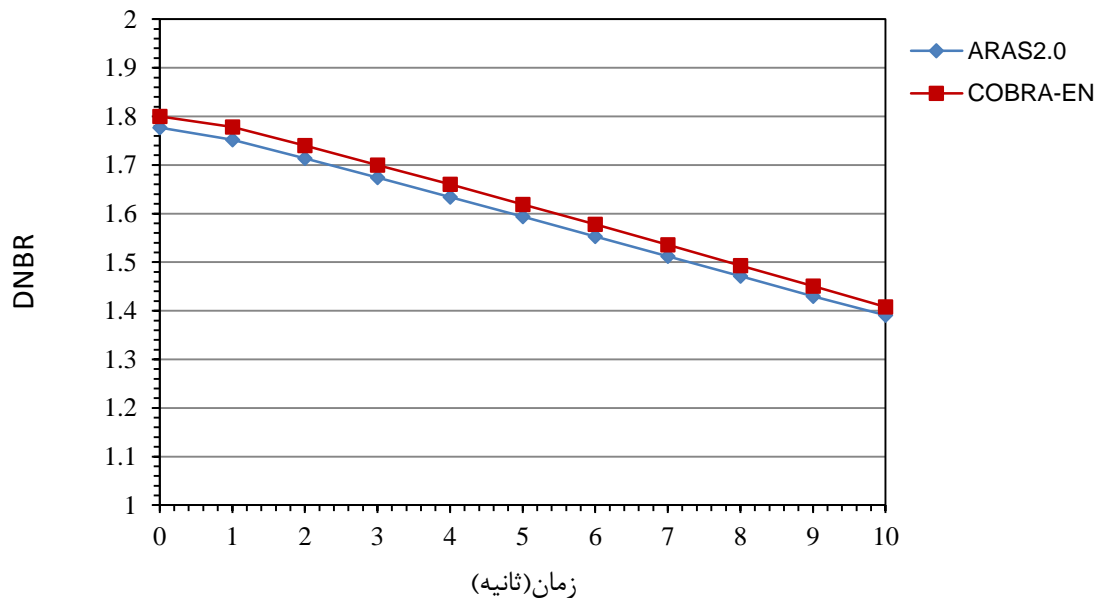


شکل ۲۶: تغییرات دبی جریان عرضی از کانال داغ به کانال‌های همسایه آن در سه مقطع زمانی در طول کانال‌ها

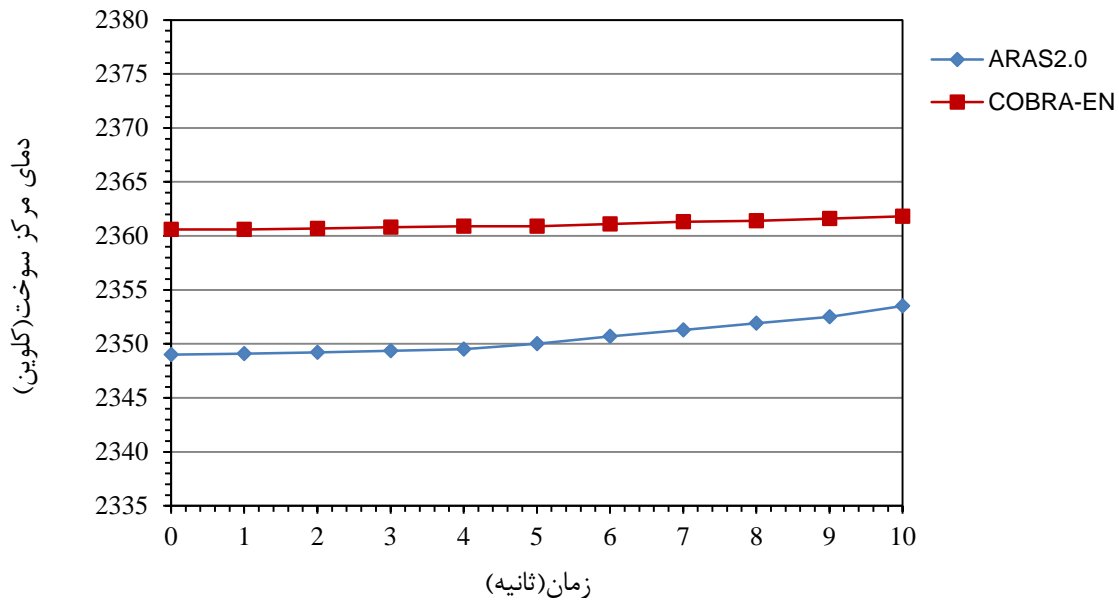
در شکل رسم شده برای دبی جریان عرضی با توجه به زیاد بودن نتایج تنها مقادیر جریان منتقل شده از کانال شماره ۱ به عنوان کانال داغ به کانال‌های مجاور آن نشان داده شده است. این نتایج همچنین برای سه مقطع زمانی شروع محاسبات، ثانیه‌ی پنجم و ثانیه آخر ترسیم گردیده است. علاوه بر این با توجه به برابری فشار در مقاطع طولی کانال‌های مختلف تنها یک نتیجه برای فشار رسم شده است.



شکل ۲۷: تغییرات زمانی کمینه شار حرارتی بحرانی برای کانال شماره ۱ (کانال داغ)



شکل ۲۸: تغییرات DNBR در انتهای میله داغ



شکل ۲۹: تغییرات زمانی بیشینه دمای مرکز سوخت برای میله داغ

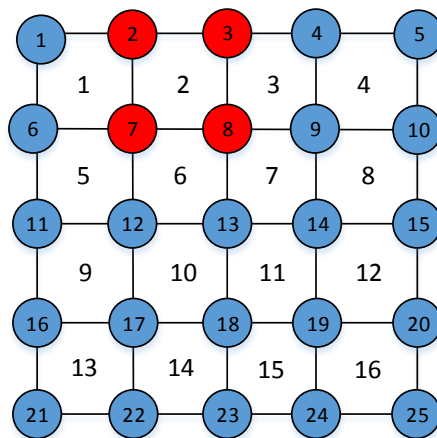
بدین ترتیب مشاهده می‌گردد که با کاهش دبی جریان افت فشار کاهش یافته در حالیکه دما افزایش یافته و سیال در ثانیه ۴ به حالت دوفازی رسیده است.

۱۰-۲- مسئله شماره ۲

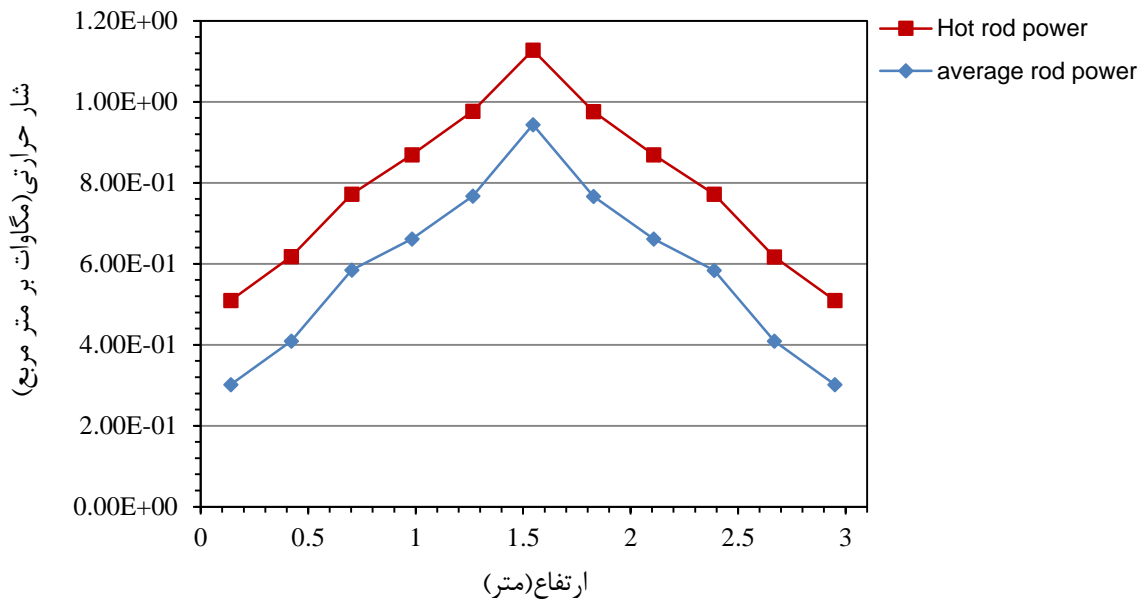
در مسئله نمونه دوم، آرایه‌ای از ۲۵ میله سوخت به صورت چهار وجهی در نظر گرفته شده است که نمایش ساده‌ای از آن در شکل ۳۰ نشان داده شده است که تعداد کانال‌ها در این مسئله برابر ۱۶ می‌باشد. برای این سیستم فرض می‌گردد مشخصات ارائه شده در جدول شماره (۴) برقرار باشد (داده‌های ارائه شده تقریباً مشابه مقادیر یک راکتور آب سبک تحت فشار نوع غربی است). در این حالت فرض می‌شود که توزیع توان محوری به صورت توزیع متقارن 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 ۳۱ نشان داده شده است.

جدول شماره ۴: مشخصات مسئله شماره ۲

شماره	پارامتر	مقدار
۱	دبی جرمی ورودی به هر کانال (کیلوگرم بر ثانیه)	۰/۲۲۹۹
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)	توپر
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

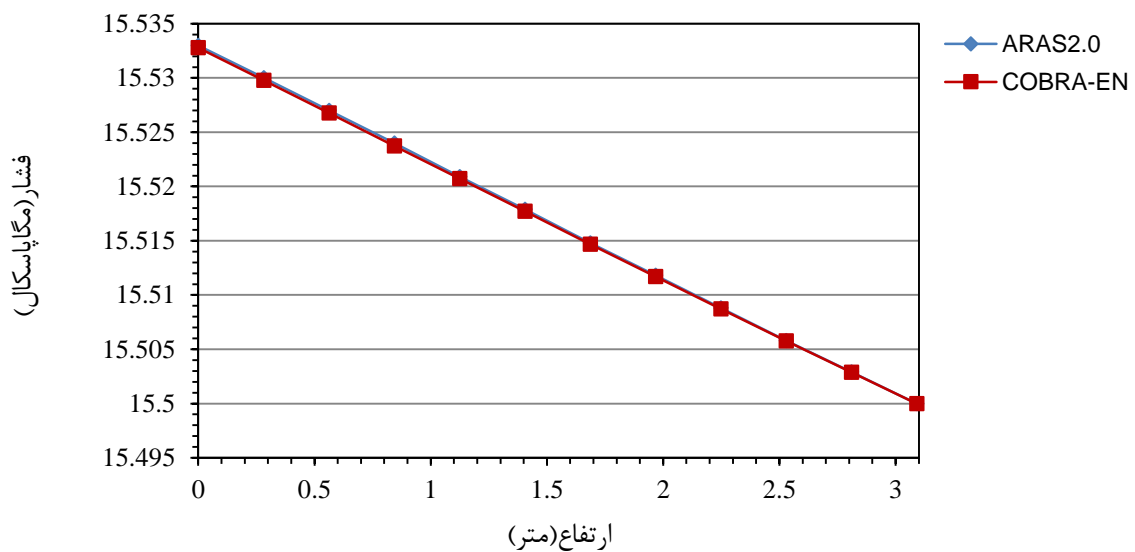


شکل ۳۰: آرایش ۲۵ میله سوخت در آرایش چهار وجهی

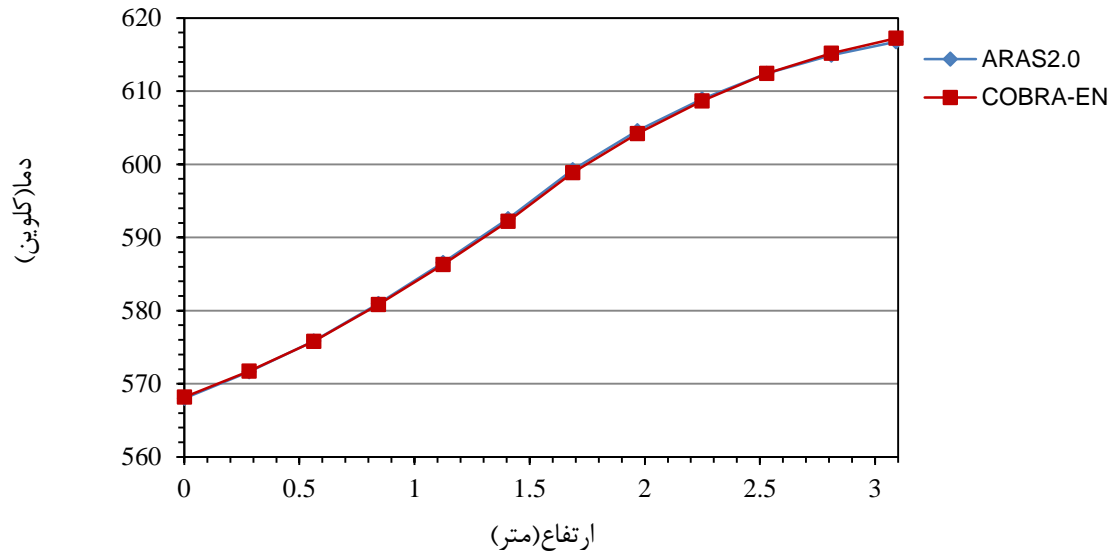


شکل ۳۱: توزیع محوری شار حرارتی در میله‌های داغ و با توان متوسط

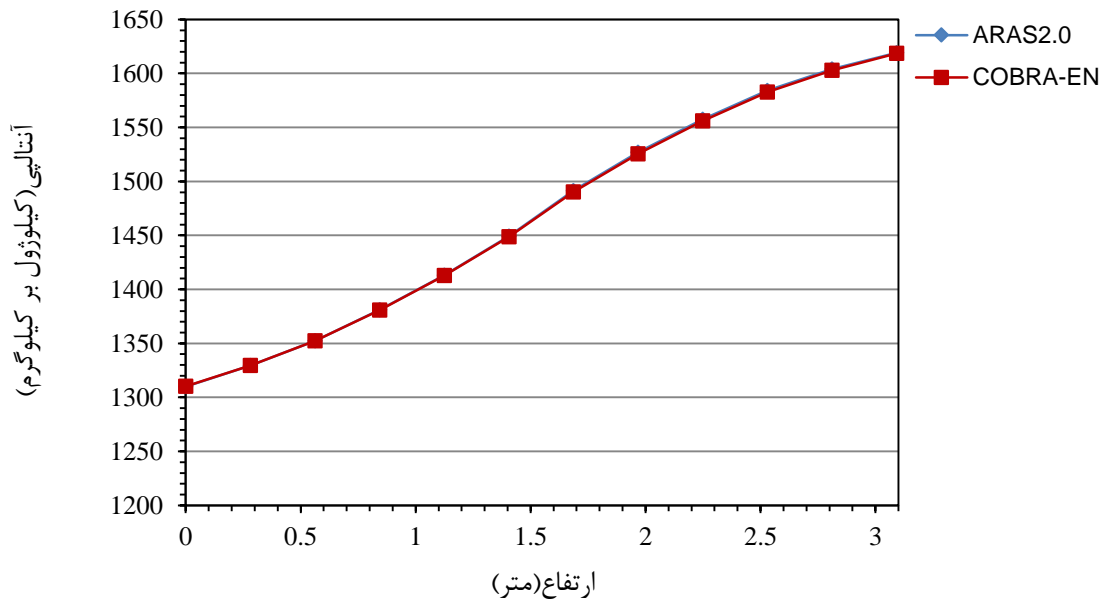
در این مسئله نیز مانند قبل ابتدا نتایج در حالت پایا برای پارامترهای سیال و سوخت در شکل‌های ۳۲ تا ۴۰ نشان داده شده است. علاوه بر این در کنار این نتایج، نتایج به دست آمده از کد تجاری COBRA-EN نیز به همراه این شکل‌ها برای مقایسه آورده شده است.



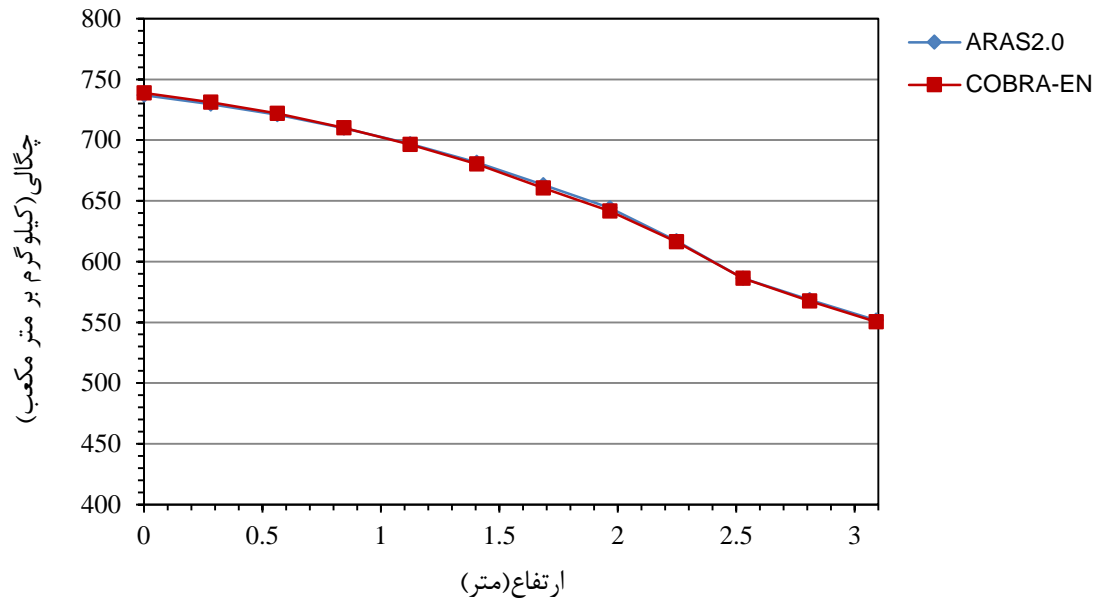
شکل ۳۲: توزیع محوری فشار برای کانال شماره ۲ (کانال داغ)



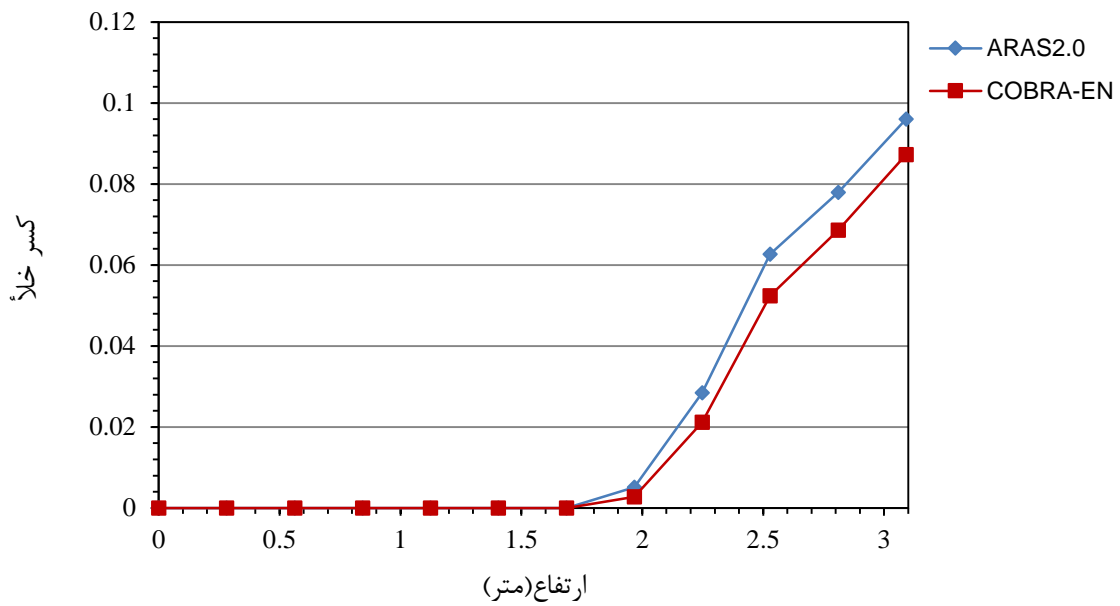
شکل ۳۳: توزیع محوری دمای سیال برای کانال شماره ۲ (کانال داغ)



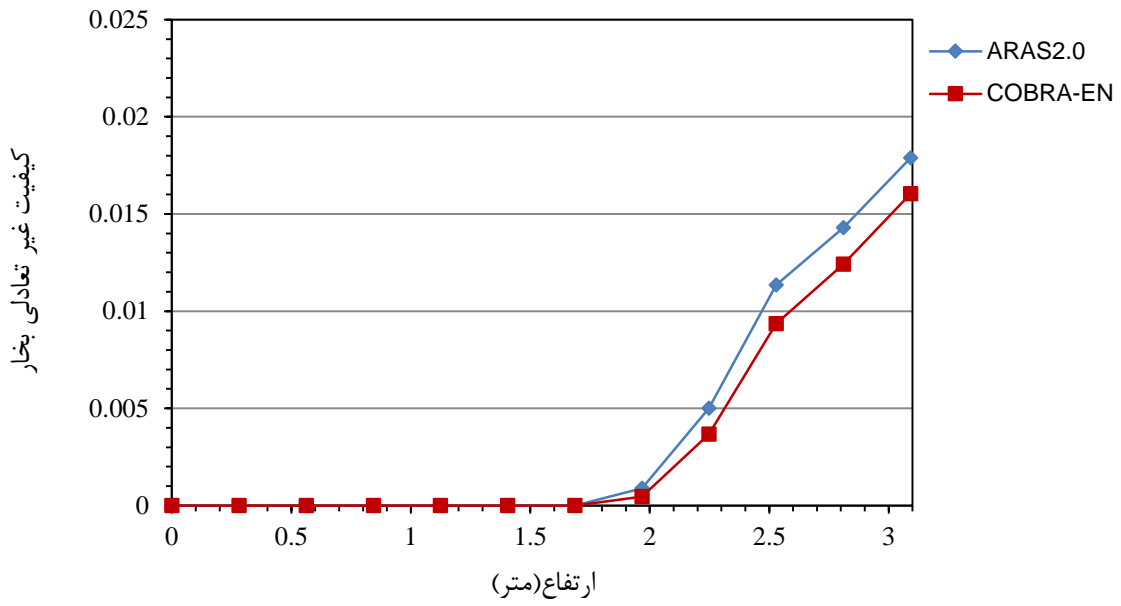
شکل ۳۴: توزیع محوری آننتالپی سیال برای کانال شماره ۲ (کانال داغ)



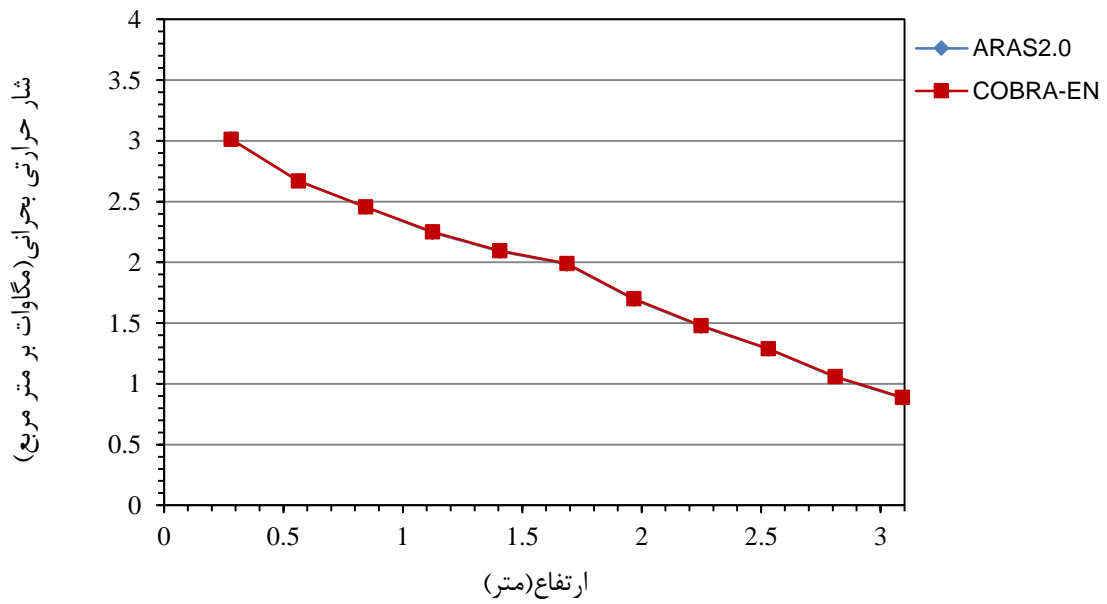
شکل ۳۵: توزیع محوری چگالی سیال برای کانال شماره ۲ (کانال داغ)



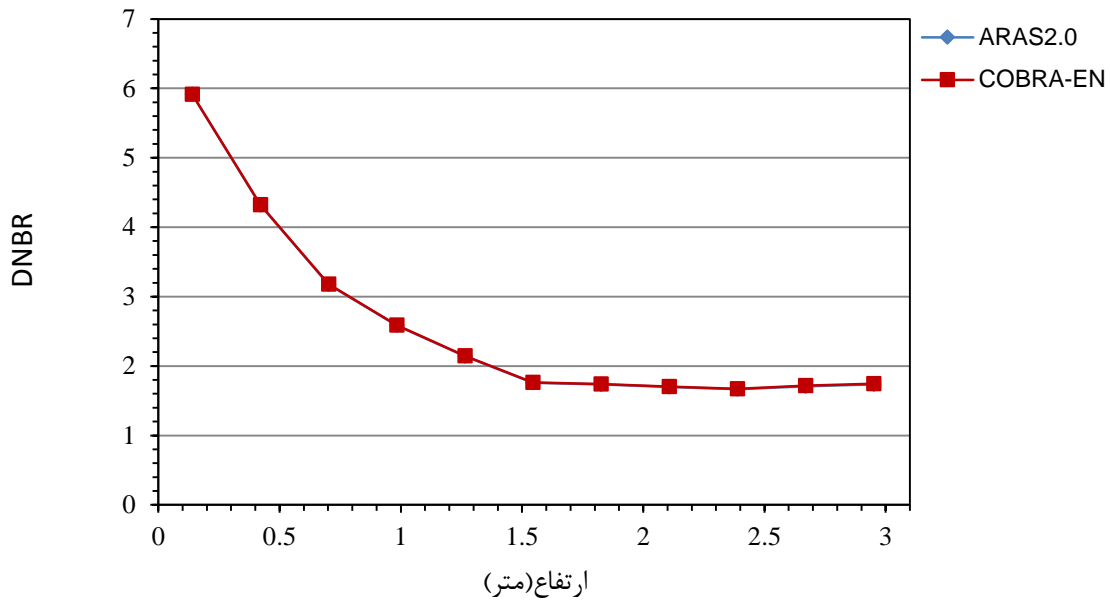
شکل ۳۶: توزیع محوری کسر خلا برای کانال شماره ۲ (کانال داغ)



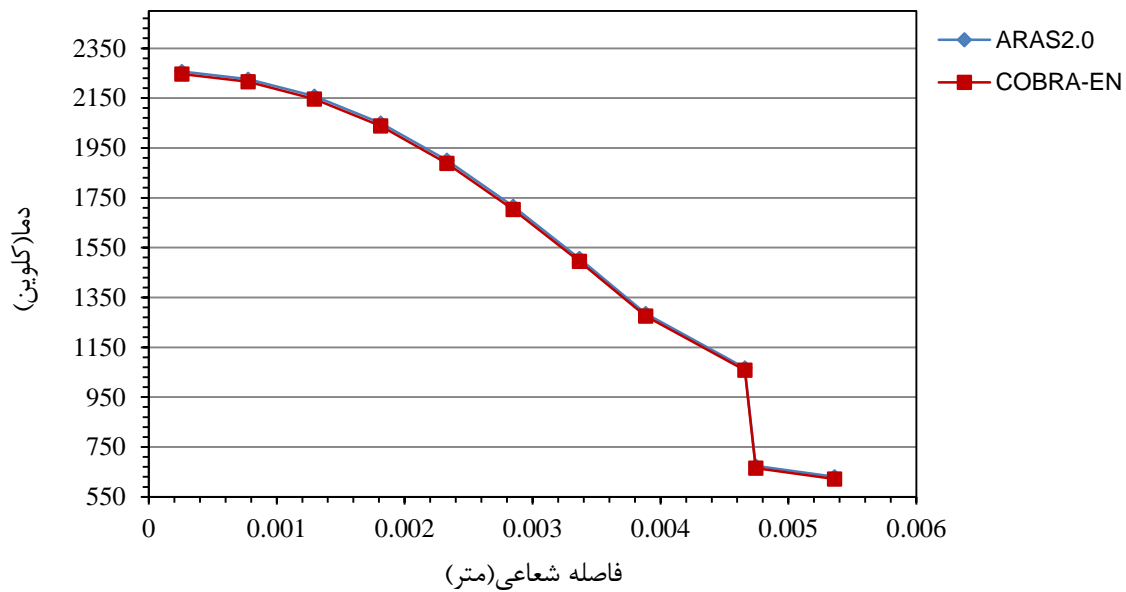
شکل ۳۷: توزیع محوری کیفیت غیر تعادلی بخار برای کانال شماره ۲ (کانال داغ)



شکل ۳۸: توزیع محوری شار حرارتی بحرانی برای کانال شماره ۲ (کانال داغ)

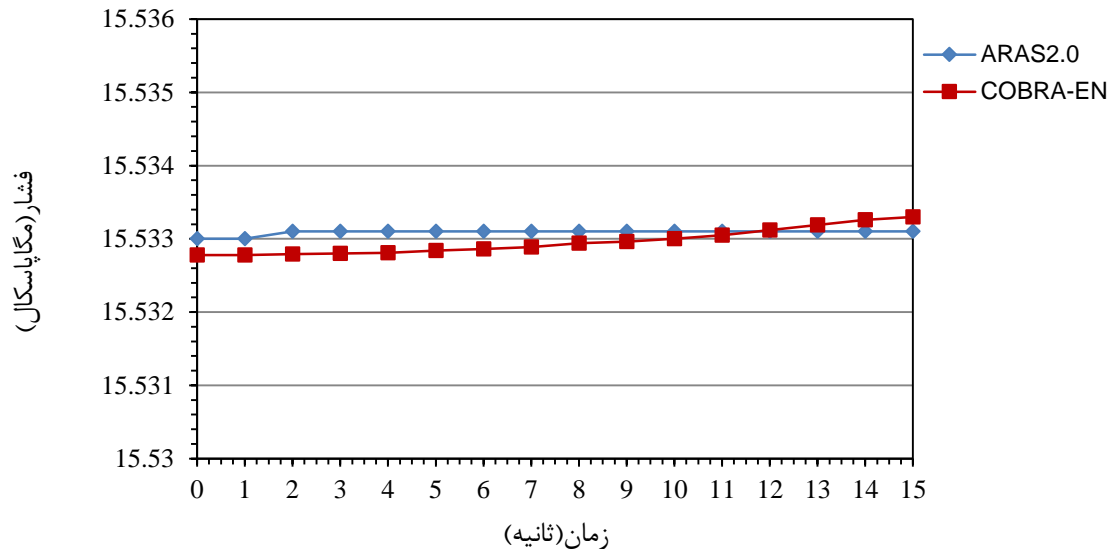


شکل ۳۹: توزیع محوری DNBR برای میله داغ

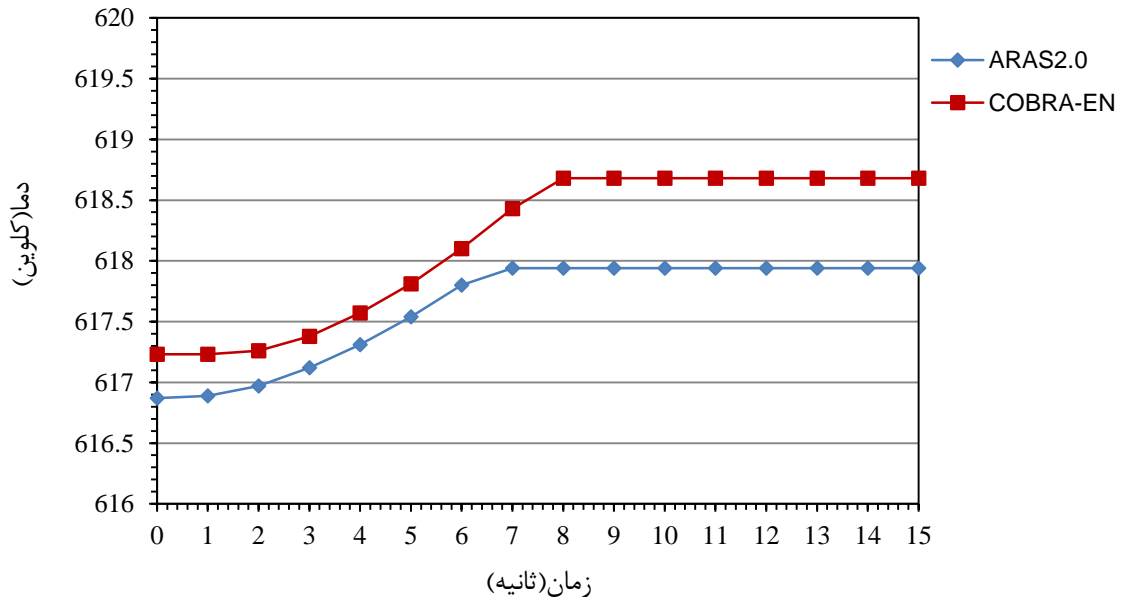


شکل ۴۰: توزیع شعاعی بیشینه دمای سوخت برای میله داغ

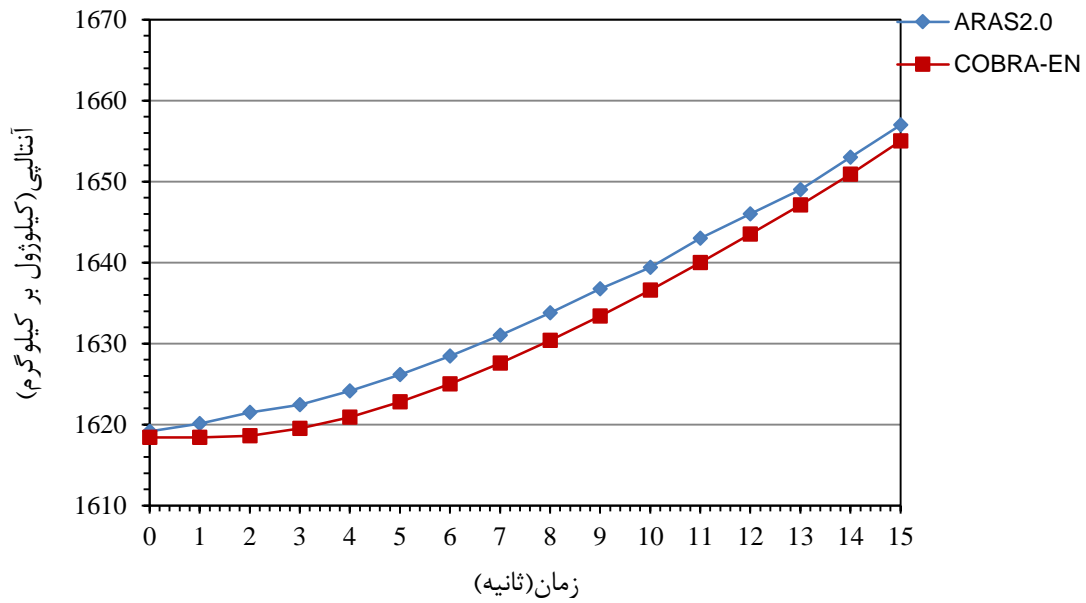
در این مثال برای بررسی حالت گذرا، تغییرات زمانی شار حرارتی تولید شده در سوخت در نظر گرفته شده است. این حالت گذرا بدین ترتیب است که در بازه زمانی ۱۵ ثانیه توان تولیدی در میله سوخت ۲۰ درصد افزایش یافته است. بر این اساس نتایج حاصل در شکل‌های ۴۱ تا ۵۰ ترسیم گردیده است.



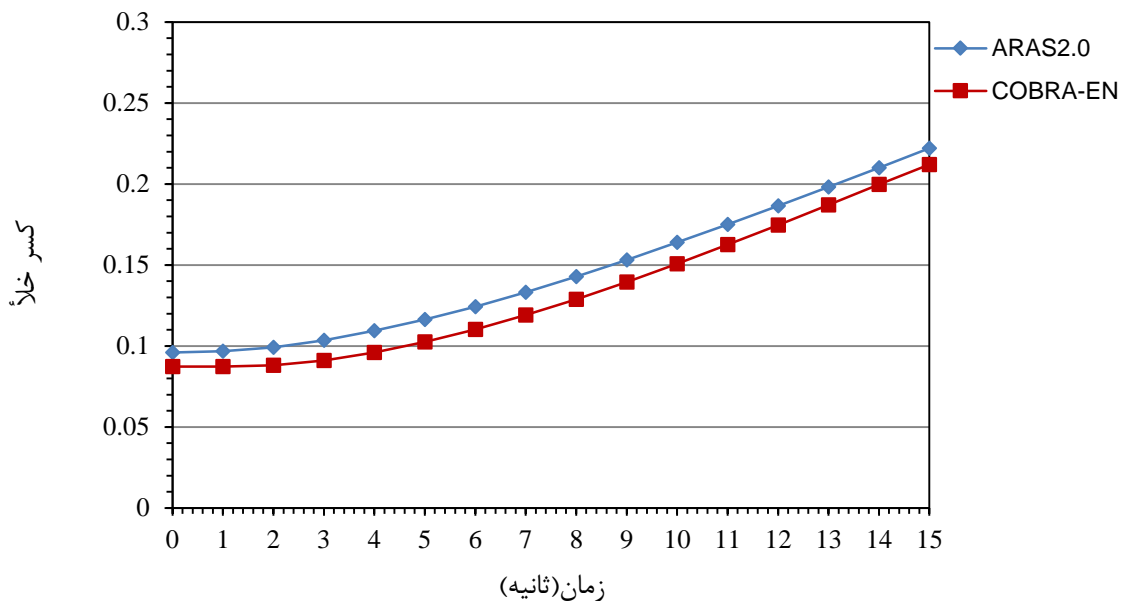
شکل ۴۱: تغییرات زمانی فشار سیال در ورودی کانال



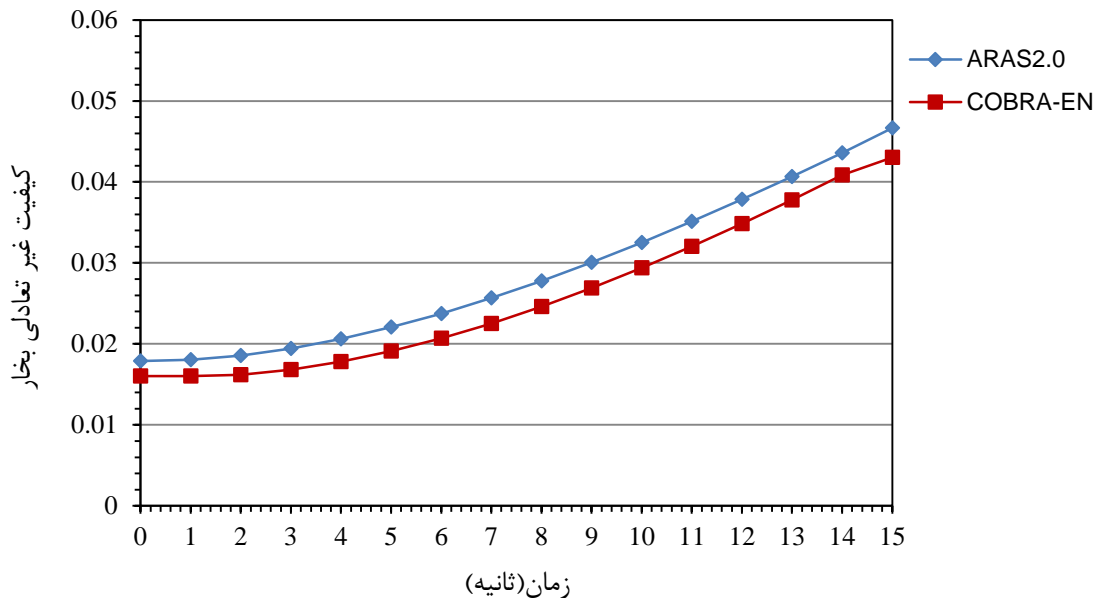
شکل ۴۲: تغییرات زمانی دمای سیال در خروجی کانال داغ (کانال شماره ۲)



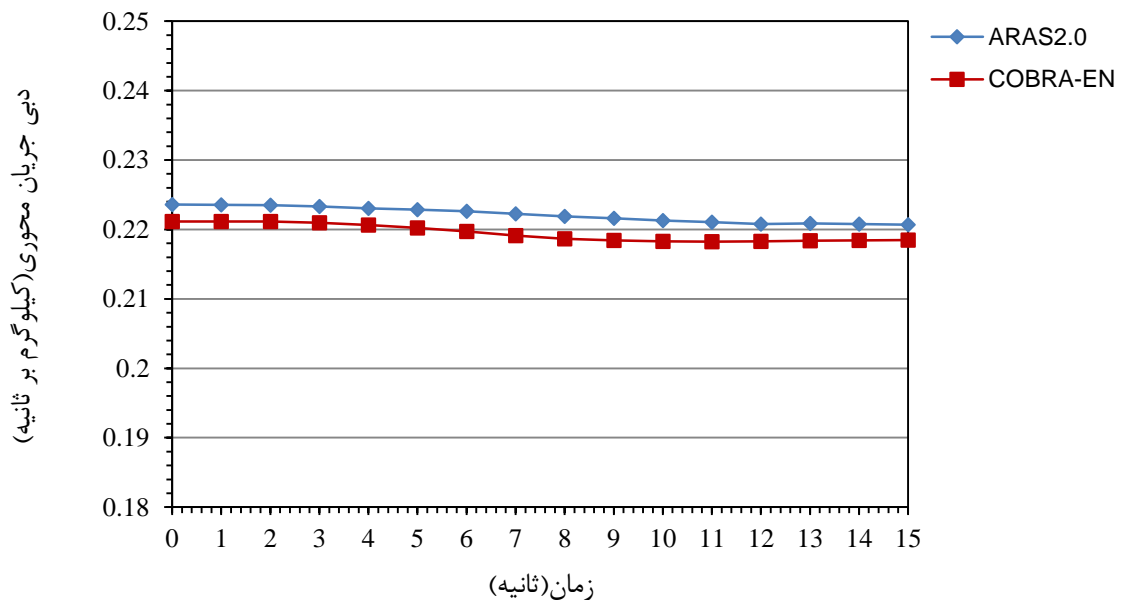
شکل ۴۳: تغییرات زمانی آنتالپی سیال در خروجی کانال داغ (کانال شماره ۲)



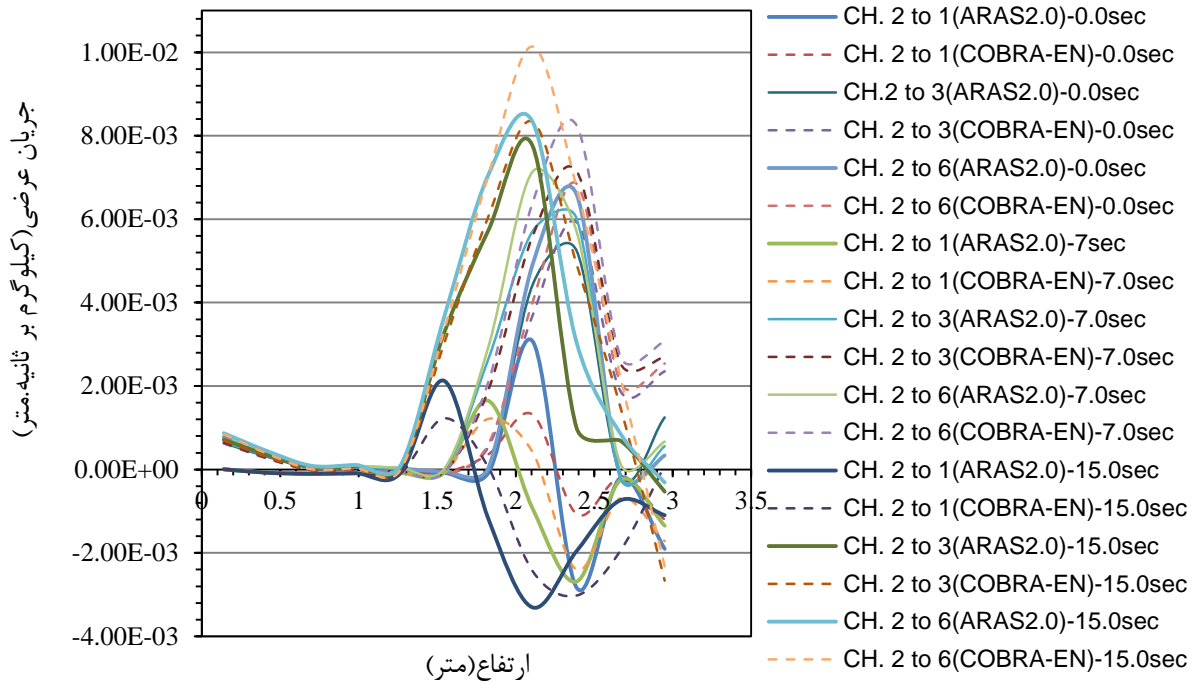
شکل ۴۴: تغییرات زمانی کسرخلأ سیال در خروجی کانال داغ (کانال شماره ۲)



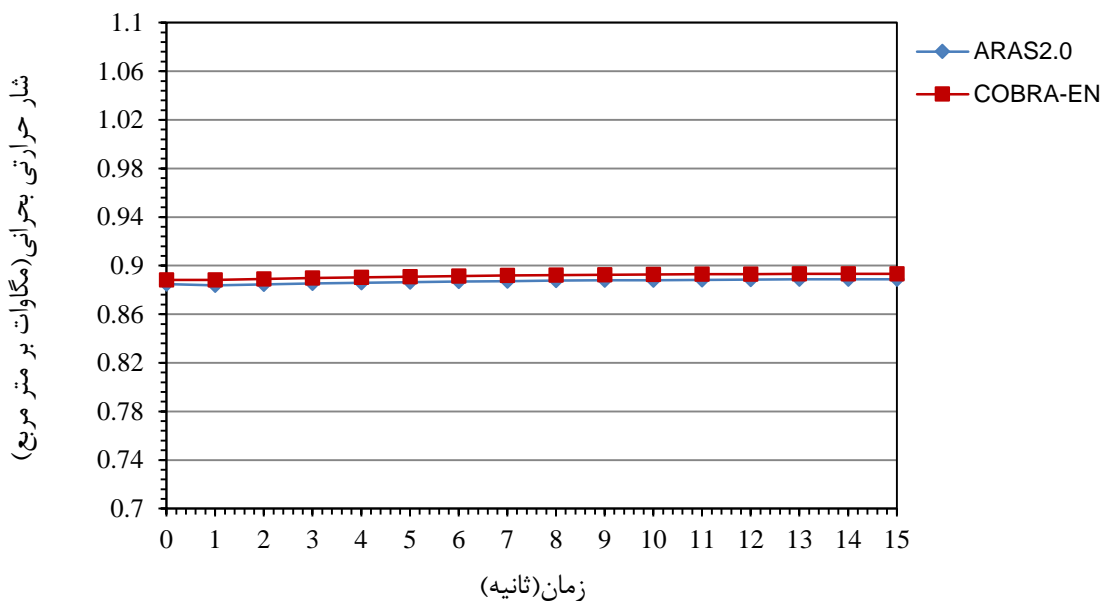
شکل ۴۵: تغییرات زمانی کیفیت غیرتعادلی بخار سیال در خروجی کانال داغ (کانال شماره ۲)



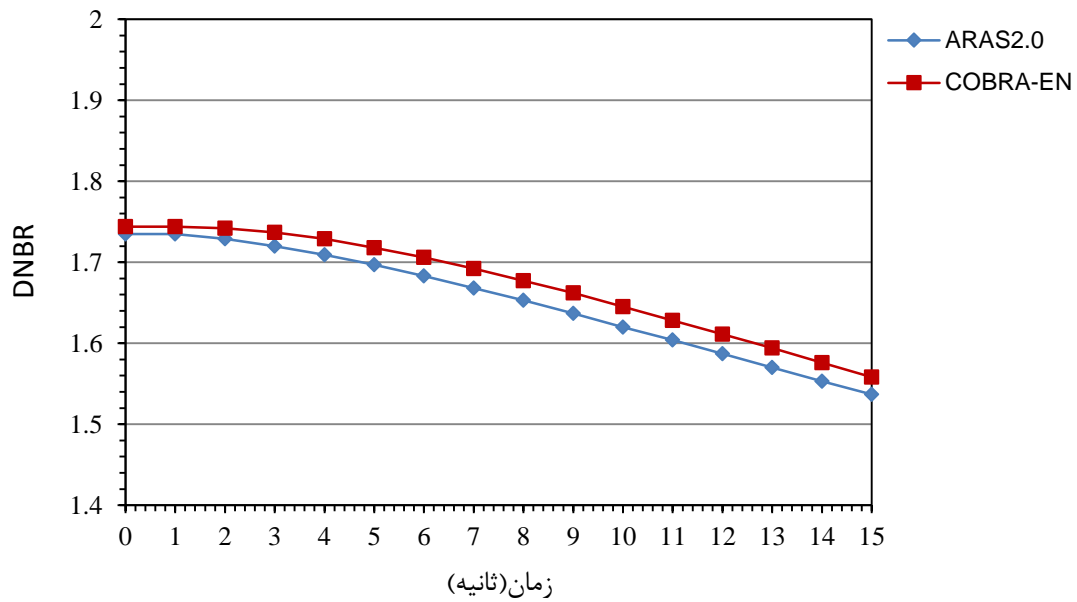
شکل ۴۶: تغییرات زمانی دبی جریان محوری سیال در خروجی کانال داغ (کانال شماره ۲)



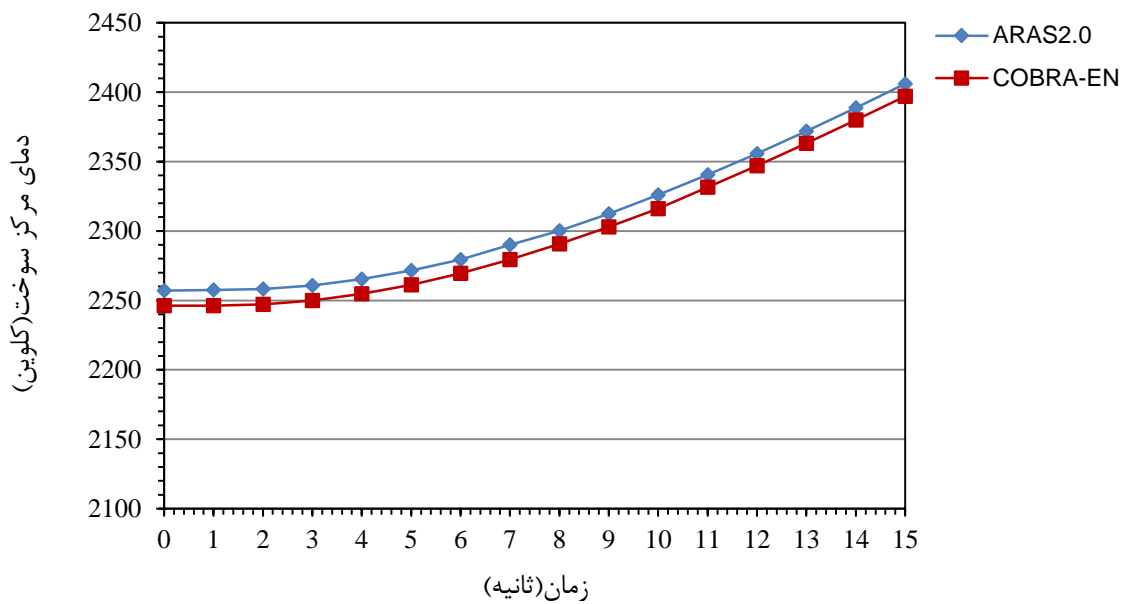
شکل ۴۷: تغییرات دبی جریان عرضی از کانال داغ به کانال‌های همسایه آن در سه مقطع زمانی در طول کانال‌ها



شکل ۴۸: تغییرات زمانی شار حرارت بحرانی در خروجی کانال داغ (کانال شماره ۲)



شکل ۴۹: تغییرات زمانی DNBR در فاصله انتهایی میله داغ



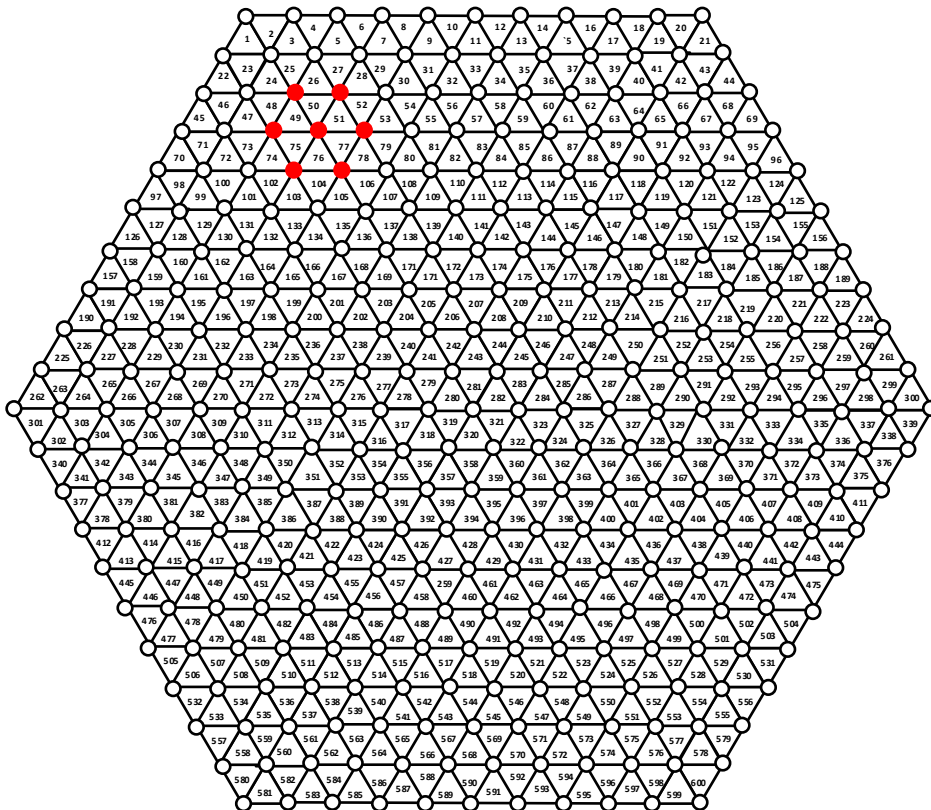
شکل ۵۰: تغییرات زمانی بیشینه دمای مرکز سوخت برای میله داغ

در این حالت گذرا نیز مشاهده می‌شود که با افزایش توان تولید شده در سوخت، حرارت منتقل شده به سیال نیز افزایش می‌یابد. این افزایش حرارت، نهایتاً منجر به افزایش دما، آنتالپی و کسر خلأ گردیده است. همچنین با توجه

به تأثیر مستقیم توان تولید شده، در دمای میله سوخت، بیشینه دمای مرکز سوخت در این حالت افزایش چشمگیری خواهد داشت.

۱۰-۳- مسئله شماره ۳

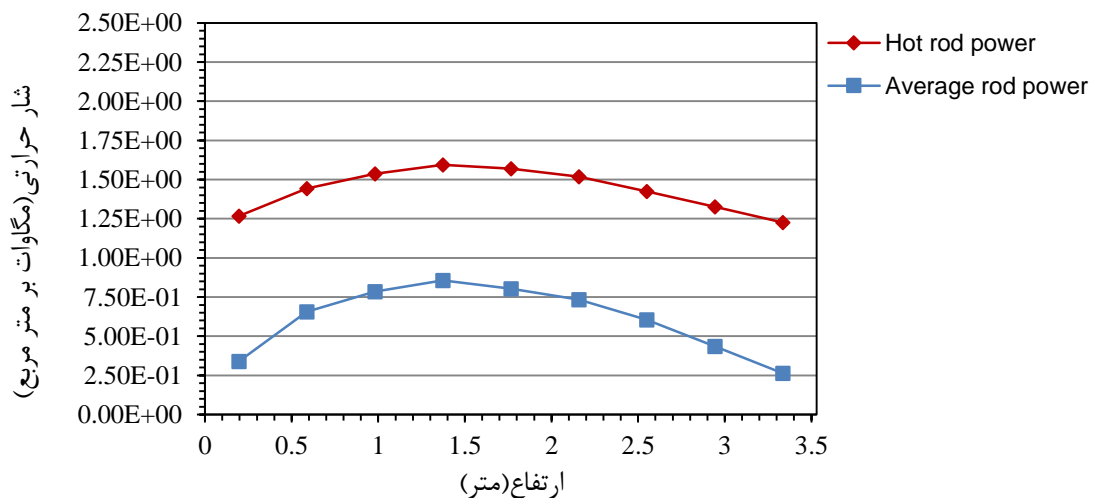
در مسئله نمونه سوم، جهت بررسی روند حل توسعه داده شده، یک مجتمع سوخت شش وجهی با ۶۰۰ کانال و ۳۳۱ میله سوخت مطابق شکل ۵۱ در نظر گرفته شده است. مشخصات مسئله مطابق با داده‌های ارائه شده در جدول شماره (۵) می‌باشد که شباهت زیادی با مشخصات یک مجتمع سوخت راکتور بوشهر دارد. در این مسئله نیز همانند مثال‌های پیشین، توان حرارتی در برخی از میله‌های سوخت با سایر میله‌ها متفاوت در نظر گرفته شده است که این توزیع توان در شکل ۵۲ نشان داده شده است. برای این مسئله فرض می‌شود که توان ۷ میله سوختی که با رنگ قرمز در شکل ۵۱ نشان داده شده است، بیشتر از توان سایر میله‌ها باشد.



شکل ۵۱: آرایش مثلی ۳۳۱ میله سوخت

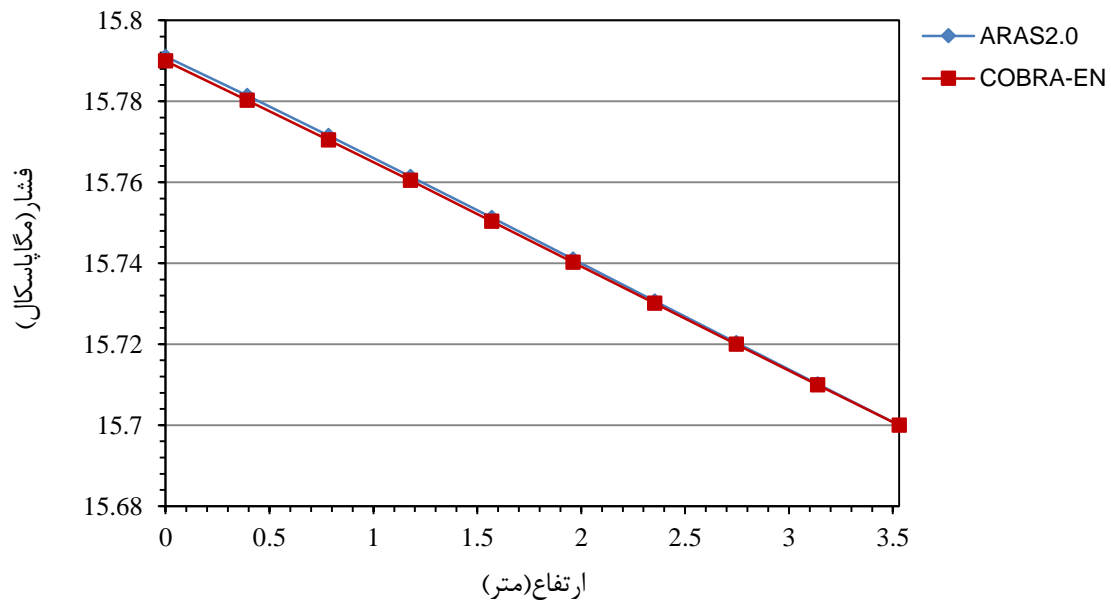
جدول شماره ۵: مشخصات مسئله شماره ۳

شماره	پارامتر	مقدار
۱	دبی جرمی ورودی هر کانال (کیلوگرم بر ثانیه)	۰/۱۷۰۴۲
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
۱۶	اندازه گام (متر)	۰/۰۱۲۷۵
۱۷	طول میله سوخت (متر)	۳/۵۳

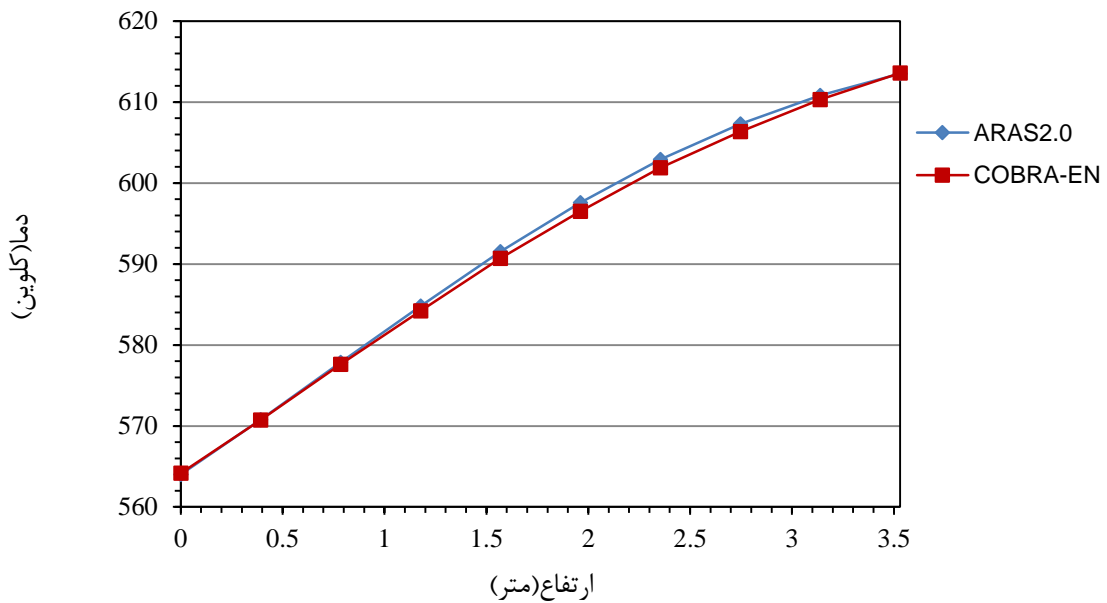


شکل ۵۲: توزیع توان در میله‌های سوخت با توان بیشینه و متوسط

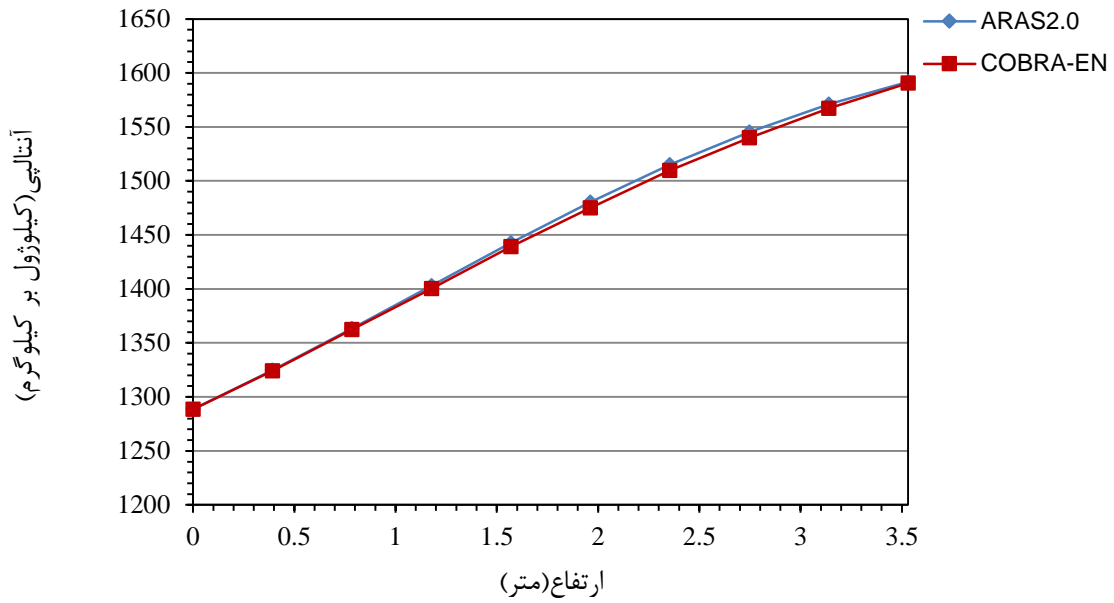
در این حالت نتایج حالت پایا برای پارامترهای مسئله در شکل‌های ۵۳ تا ۶۱ رسم گردیده است.



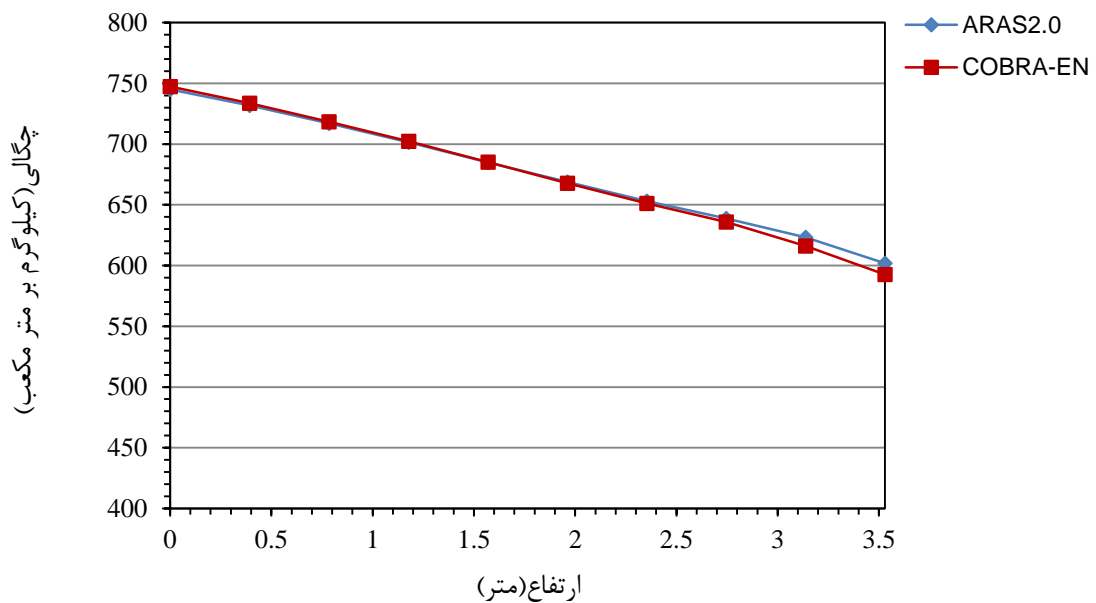
شکل ۵۳: توزیع محوری فشار برای کانال شماره ۵۰ (کانال داغ)



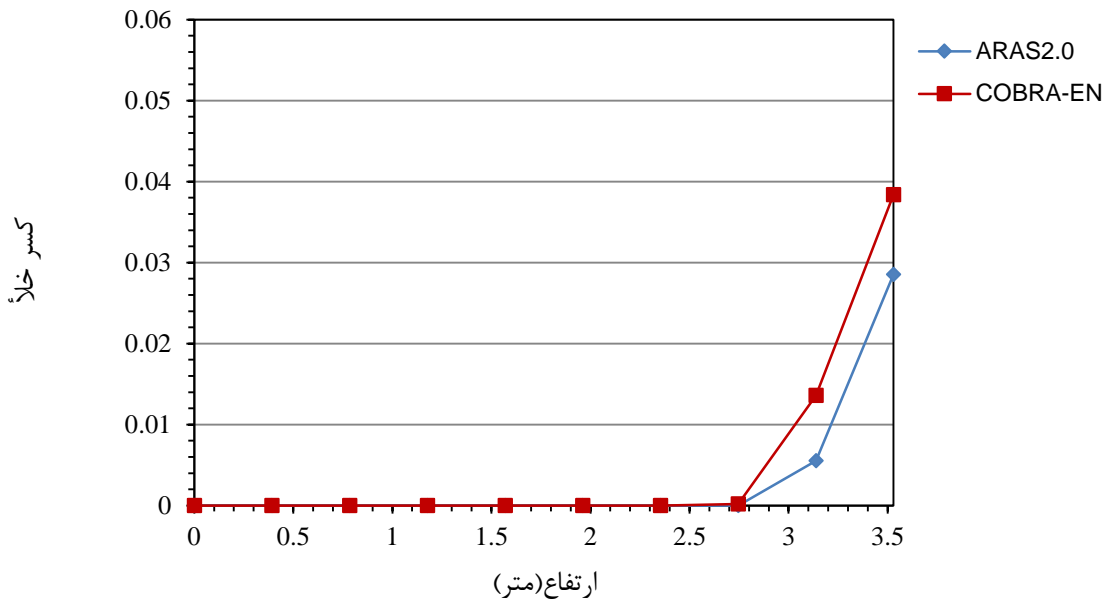
شکل ۵۴: توزیع محوری دمای سیال برای کانال شماره ۵۰ (کانال داغ)



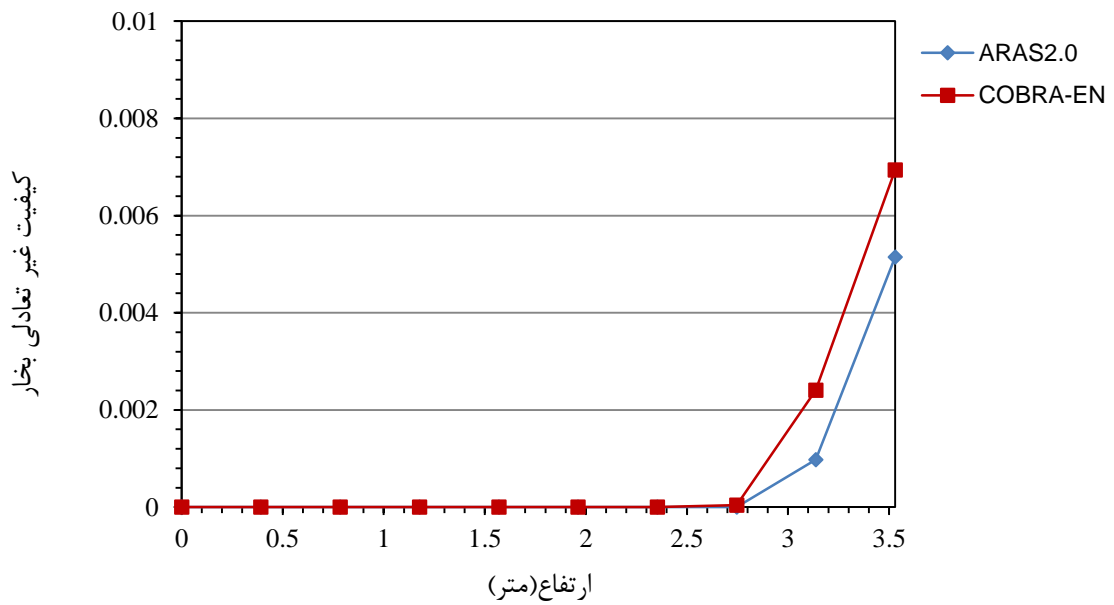
شکل ۵۵: توزیع محوری آنتالپی سیال برای کانال شماره ۵۰ (کانال داغ)



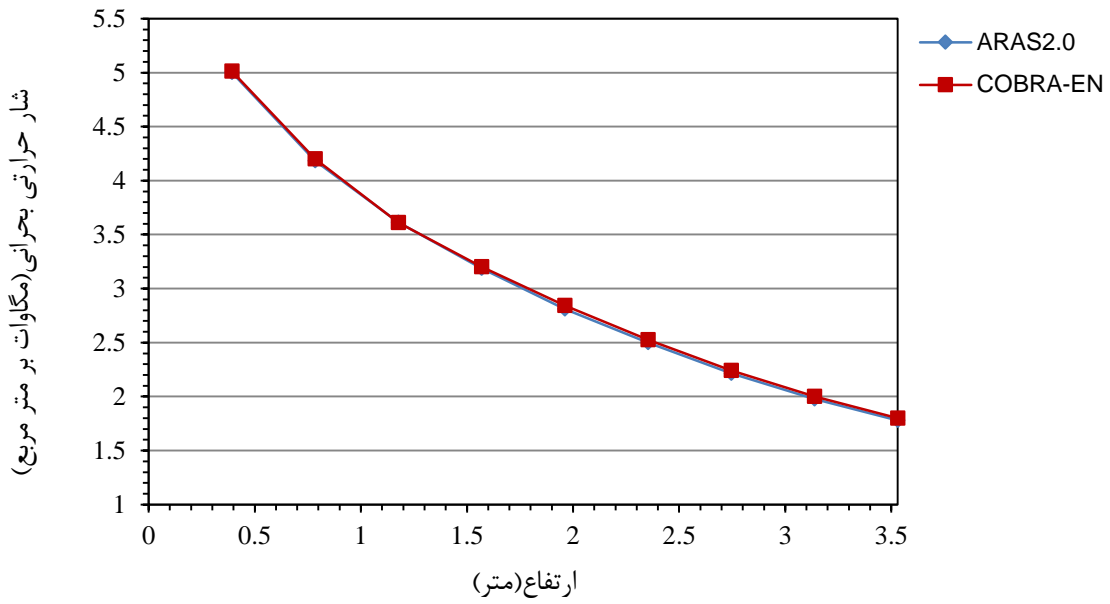
شکل ۵۶: توزیع محوری چگالی سیال برای کانال شماره ۵۰ (کانال داغ)



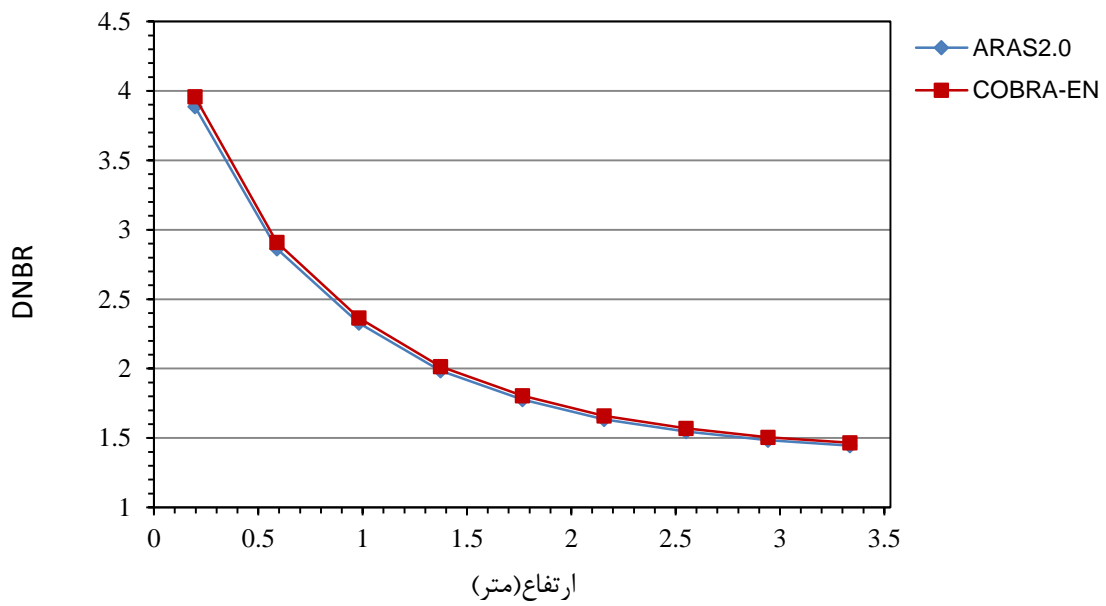
شکل ۵۷: توزیع محوری کسر خلأ برای کانال شماره ۵۰ (کانال داغ)



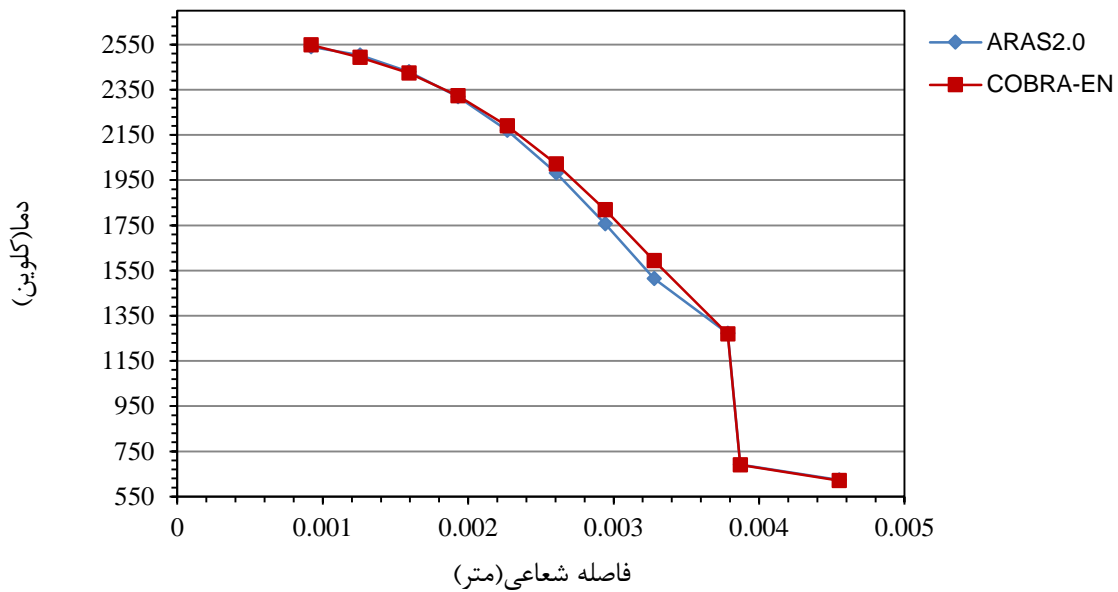
شکل ۵۸: توزیع محوری کیفیت غیر تعادلی بخار برای کانال شماره ۵۰ (کانال داغ)



شکل ۵۹: توزیع محوری شار حرارتی بحرانی برای کانال شماره ۵۰ (کانال داغ)

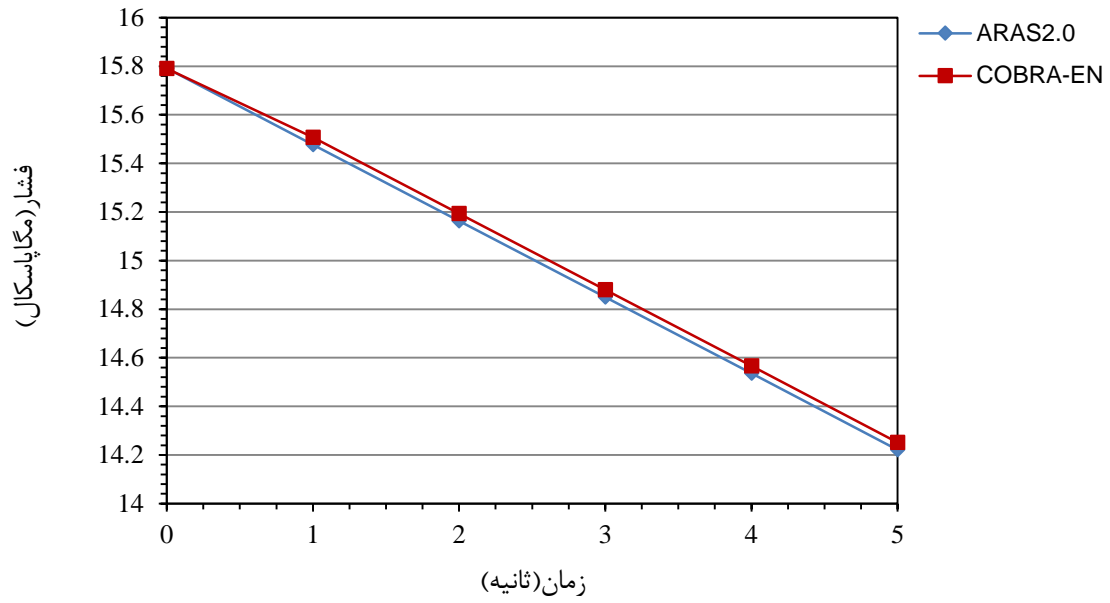


شکل ۶۰: توزیع محوری DNBR برای میله داغ

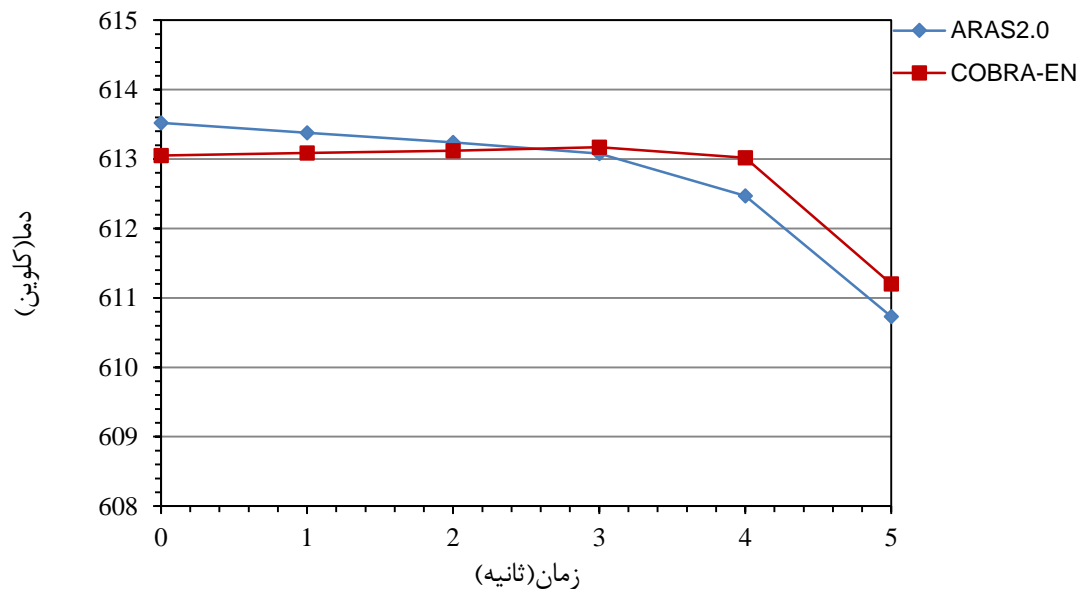


شکل ۶۱: توزیع شعاعی بیشینه دمای سوخت برای میله داغ

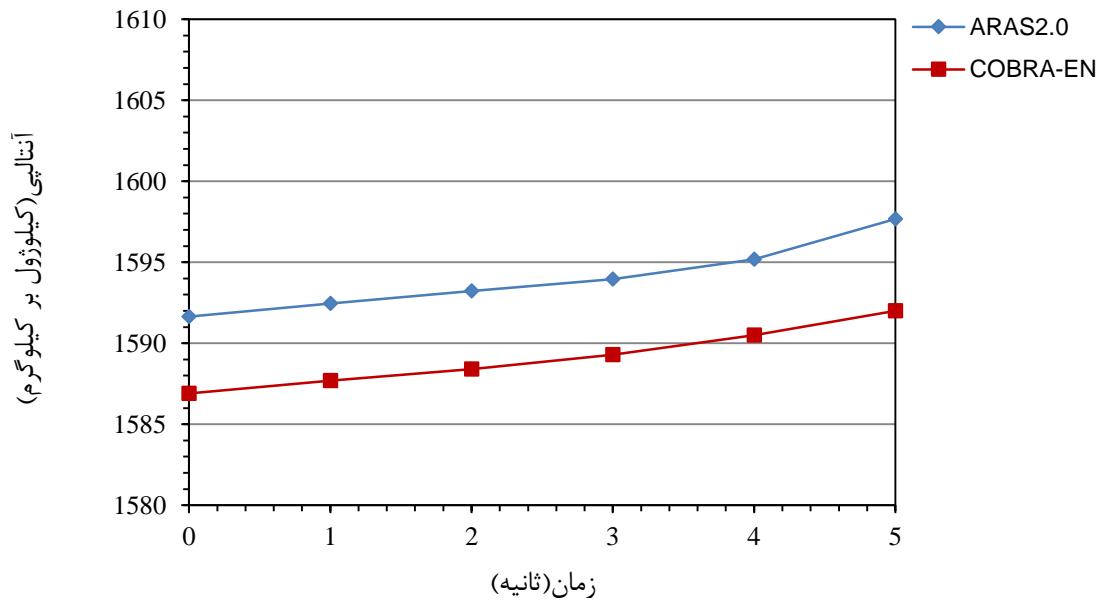
مجدداً در این مسئله نیز مشاهده می‌شود که نتایج به دست آمده در حالت پایا با نتایج حاصل از کد COBRA-EN تطابق مناسبی دارد. از طرف دیگر به منظور بررسی یکی دیگر از حالت‌های گذرای مورد نظر در کد ARAS2.0، در این مثال فرض می‌شود که فشار سیستم در مدت زمان ۵ ثانیه به ۰/۹ مقدار اولیه خود برسد. با کاهش فشار انتظار می‌رود که دما و به دنبال آن با دوفازی شدن جریان سیال در یک مقطع طولی، کسر خلأ افزایش یابد. برای این حالت گذرا نیز نتایج در طول زمان به همراه نتایج حاصل از کد COBRA-EN در شکل‌های ۶۲ تا ۷۱ نمایش داده شده است.



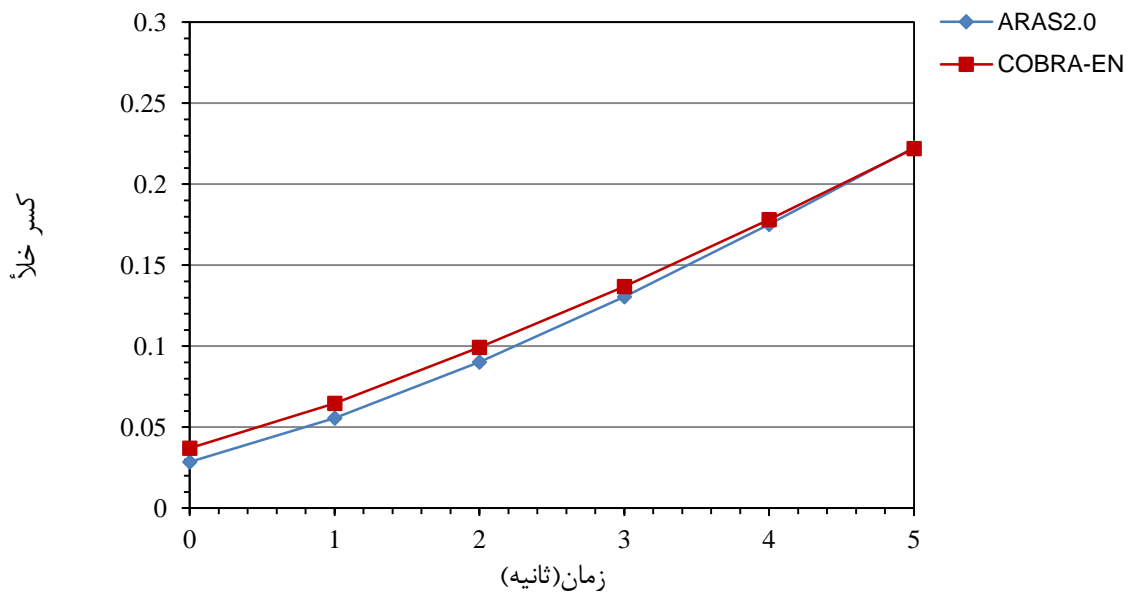
شکل ۶۲: تغییرات زمانی فشار در ورودی کانال داغ (شماره ۵۰)



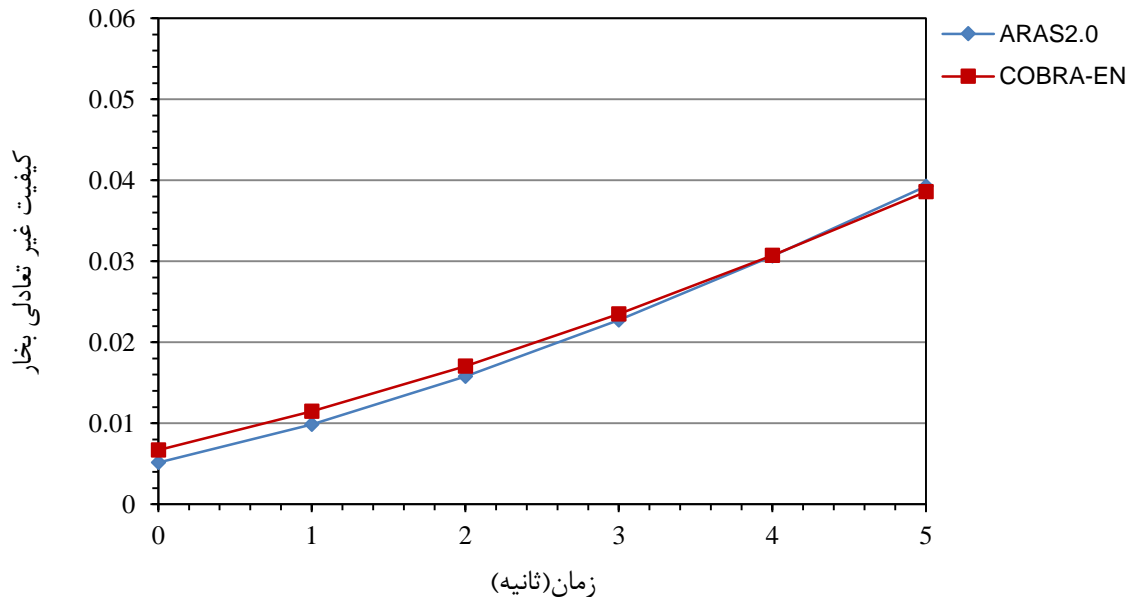
شکل ۶۳: تغییرات زمانی دمای سیال در خروجی کانال داغ (شماره ۵۰)



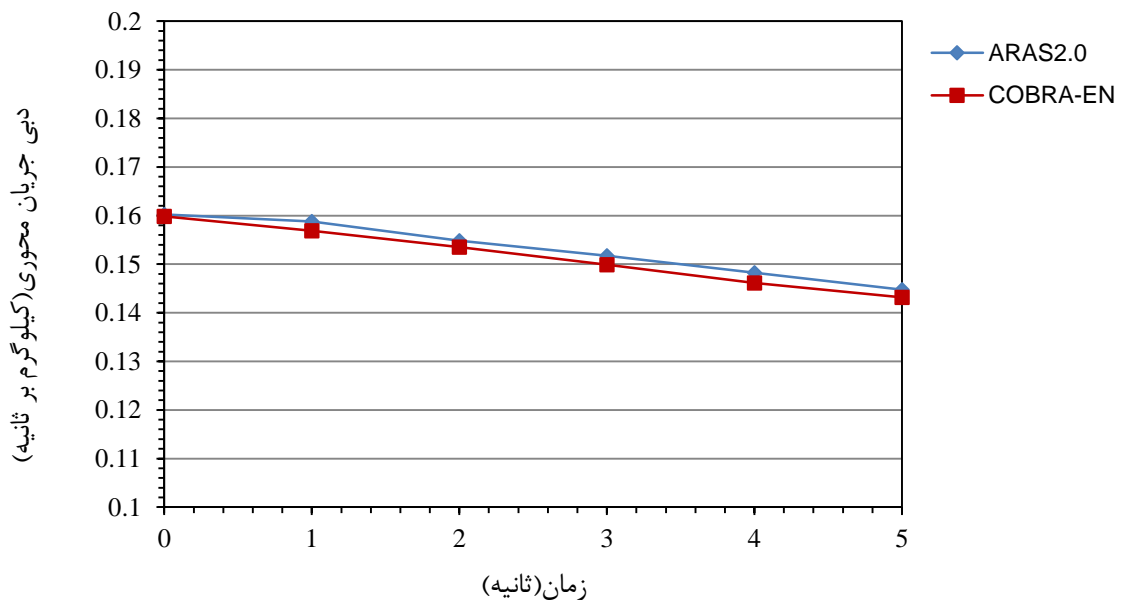
شکل ۶۴: تغییرات زمانی آنتالپی سیال در خروجی کانال داغ (شماره ۵۰)



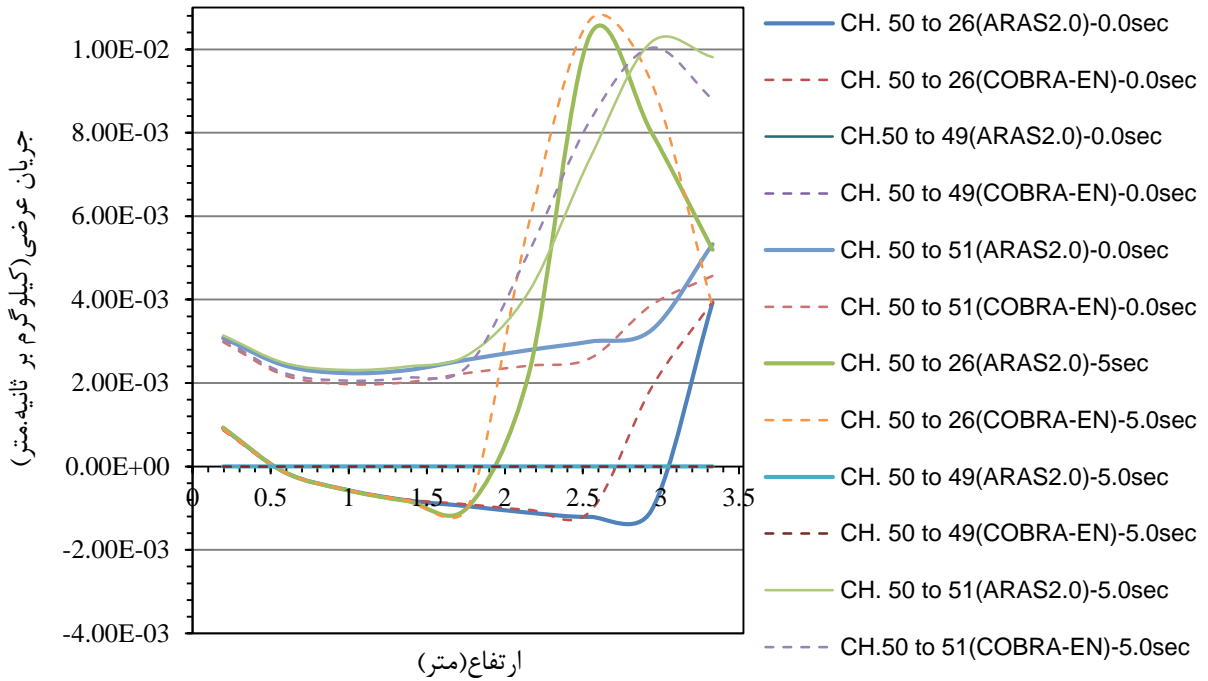
شکل ۶۵: تغییرات زمانی کسر خلأ در خروجی کانال داغ (شماره ۵۰)



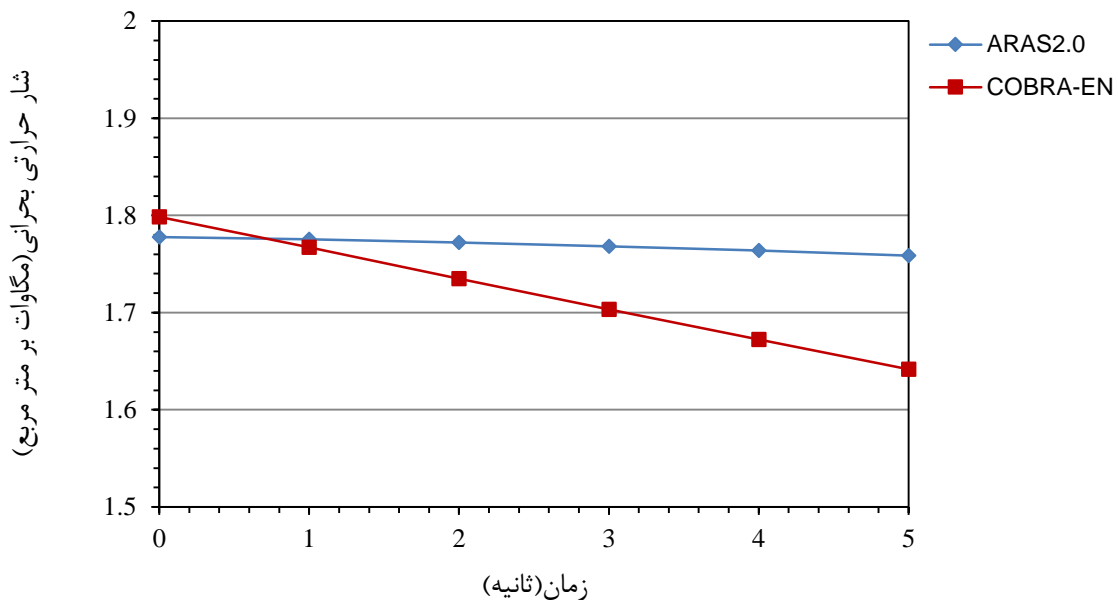
شکل ۶۶: تغییرات زمانی کیفیت غیر تعادلی بخار در خروجی کانال داغ (شماره ۵۰)



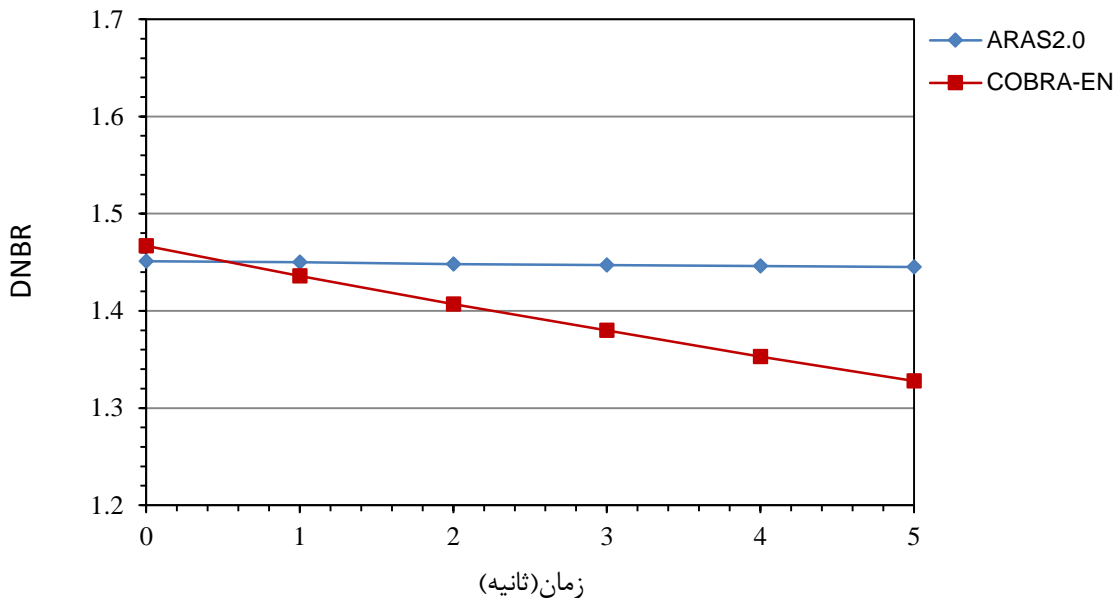
شکل ۶۷: تغییرات زمانی دبی جریان محوری سیال در خروجی کانال داغ (شماره ۵۰)



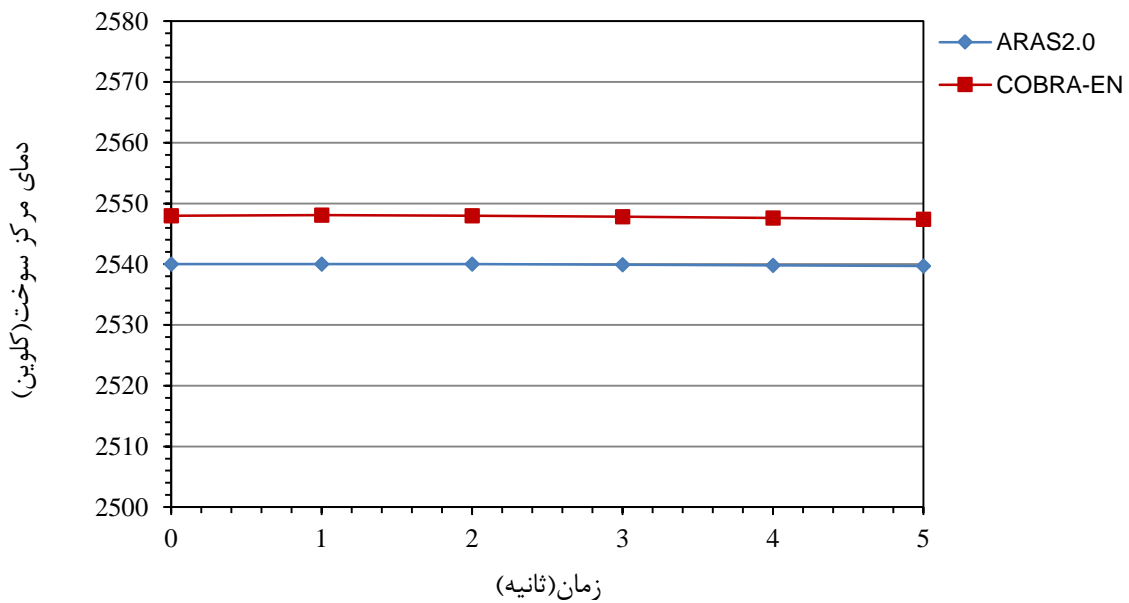
شکل ۶۸: تغییرات دبی جریان عرضی از کانال داغ به کانال‌های همسایه آن در دو مقطع زمانی در طول کانال‌ها



شکل ۶۹: تغییرات زمانی کمینه شار حرارتی بحرانی در خروجی کانال داغ (شماره ۵۰)



شکل ۷۰: تغییرات زمانی DNBR در انتهای میله داغ

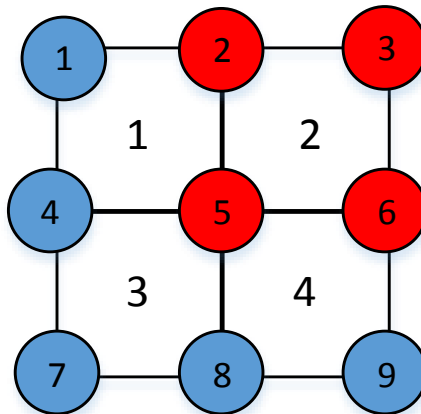


شکل ۷۱: تغییرات زمانی بیشینه دمای مرکز سوخت در میله داغ

در شکل‌های نمایش داده شده برای این حالت گذرا، مشاهده می‌شود که با کاهش فشار کسر خلأ افزایش یافته است. هرچند این افزایش در دمای سوخت تأثیر چندانی نداشته است. همچنین با توجه به اینکه دمای سیال در خروجی کانال داغ به حالت اشباع رسیده، دما با توجه به تغییرات فشار تغییر کرده است.

۴-۱۰- مسئله شماره ۴

به منظور بررسی حالت گذرای بعدی، فرض می‌شود که دمای ورودی سیال به کانال‌های جریان افزایش یابد (۱) درصد در مدت ۱۰ ثانیه). در این مسئله، آرایه‌ای از ۹ میله سوخت به صورت چهار وجهی در نظر گرفته شده است که نمایش ساده‌ای از آن در شکل ۷۲ نشان داده شده است. برای این سیستم فرض می‌گردد مشخصات ارائه شده در جدول شماره (۶) برقرار باشد. برای میله‌های سوخت با رنگ قرمز، توان بیشتری نسبت به سایر میله‌ها منظور شده است.

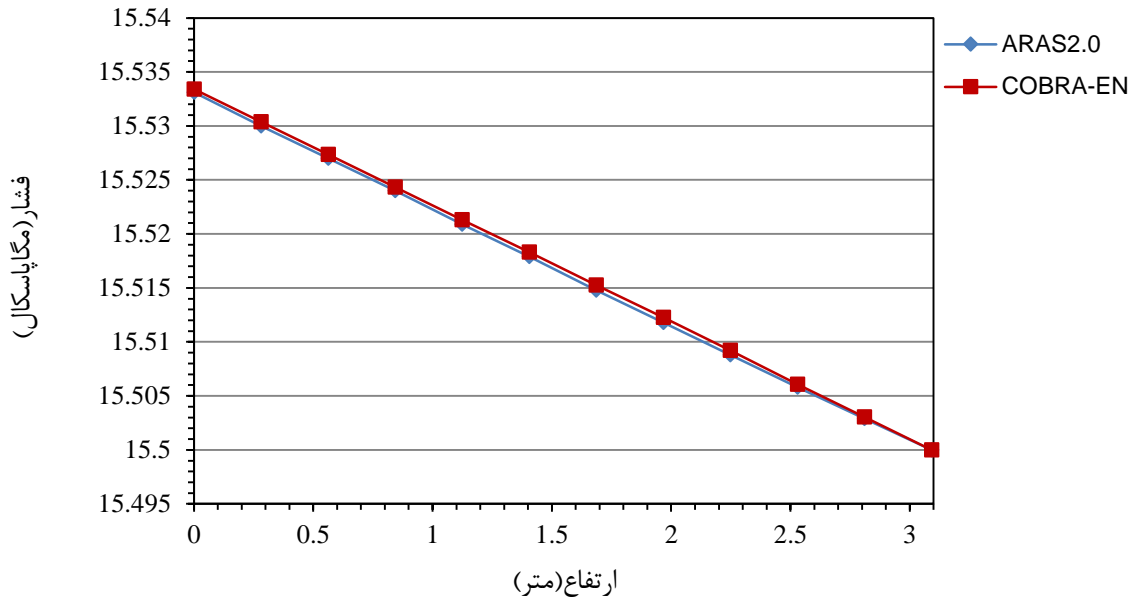


شکل ۷۲: آرایش ۹ میله سوخت در آرایش چهار وجهی

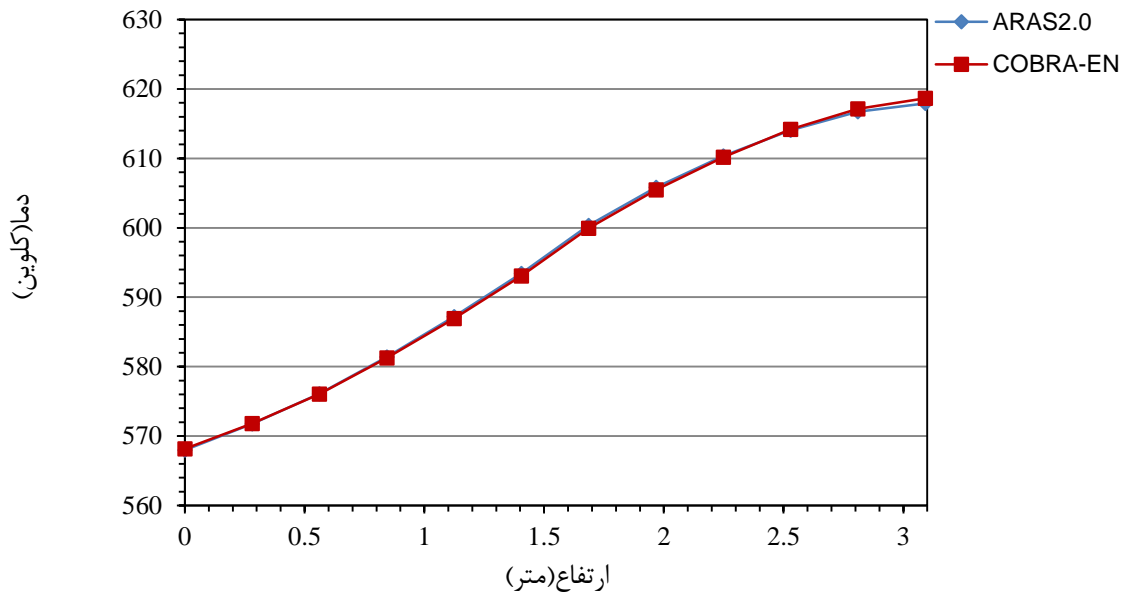
جدول شماره ۶: مشخصات مسئله شماره ۴

شماره	پارامتر	مقدار
۱	دبی جرمی ورودی به هر کانال (کیلوگرم بر ثانیه)	۰/۲۲۹۹
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)	توپر
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

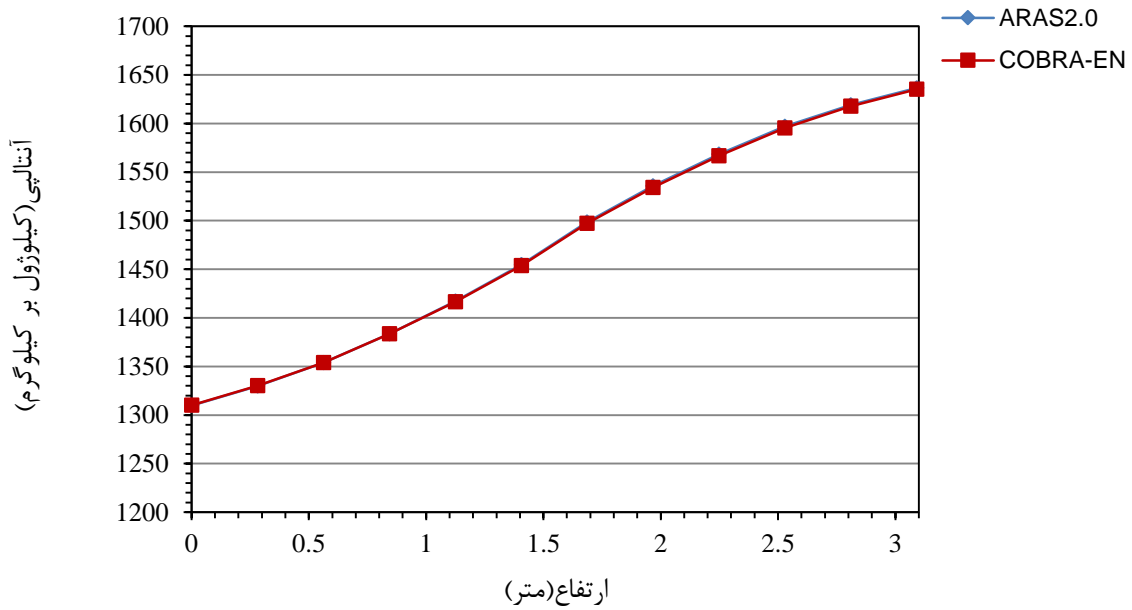
در مسئله مذکور، نتایج ارائه شده در شکل‌های ۷۳ تا ۸۱ از اجرای برنامه و مدل‌سازی مشابه در کد COBRA-EN در حالت پایا رسم شده است.



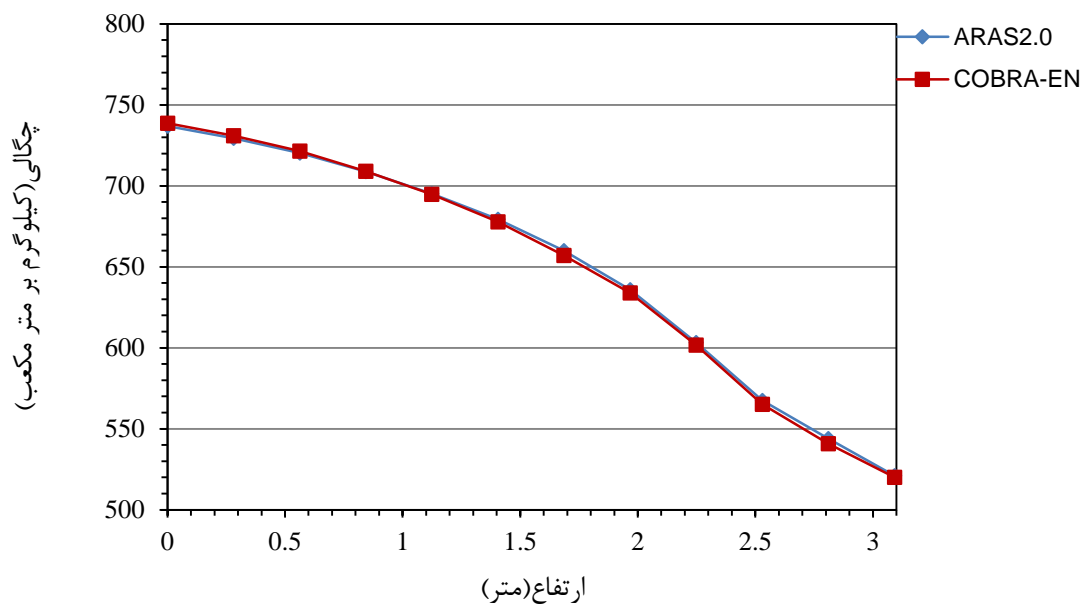
شکل ۷۳: توزیع محوری فشار در طول کانال شماره ۲ (کانال داغ)



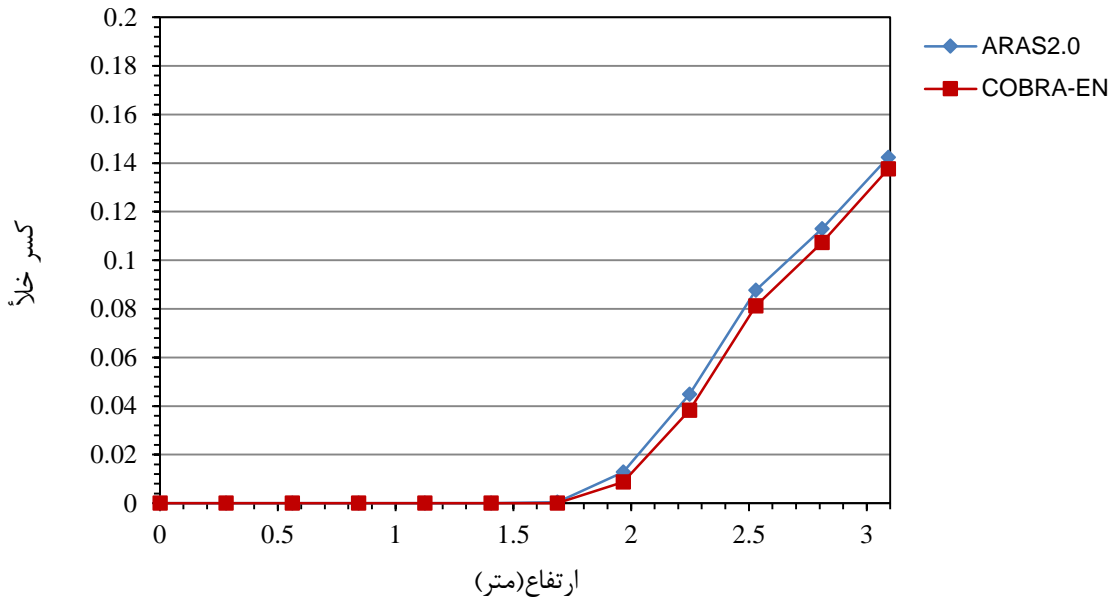
شکل ۷۴: توزیع محوری دمای سیال در طول کانال شماره ۲ (کانال داغ)



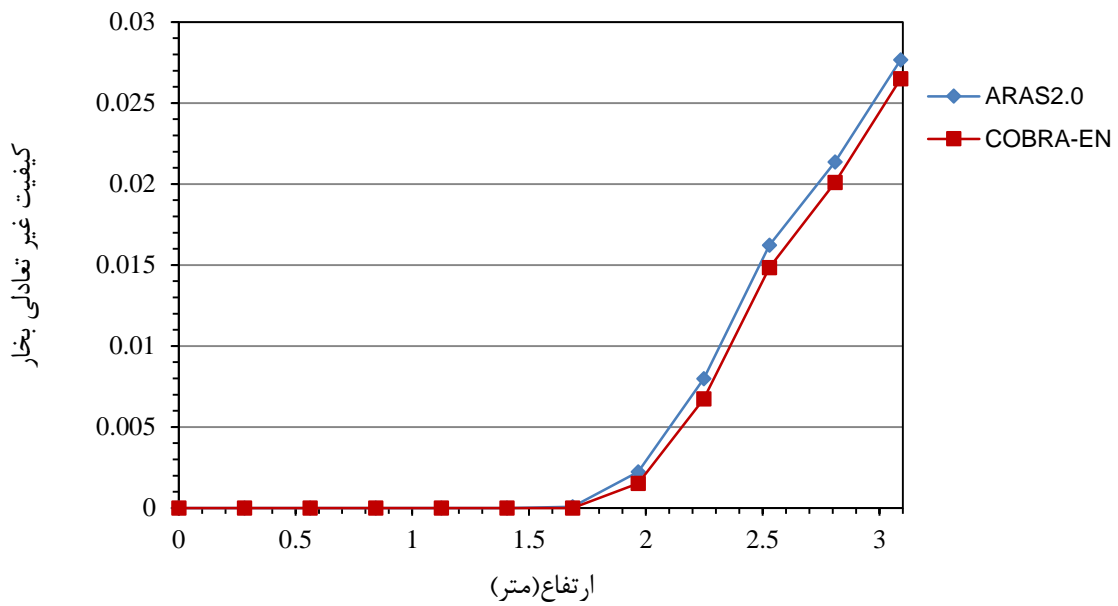
شکل ۷۵: توزیع محوری آنتالپی در طول کانال شماره ۲ (کانال داغ)



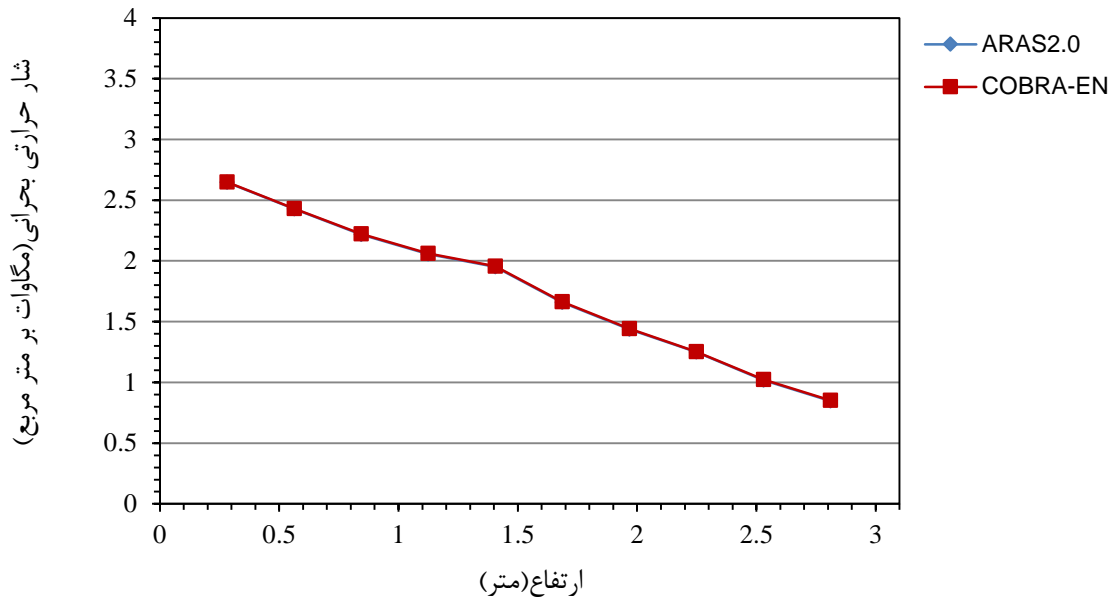
شکل ۷۶: توزیع محوری چگالی سیال در طول کانال شماره ۲ (کانال داغ)



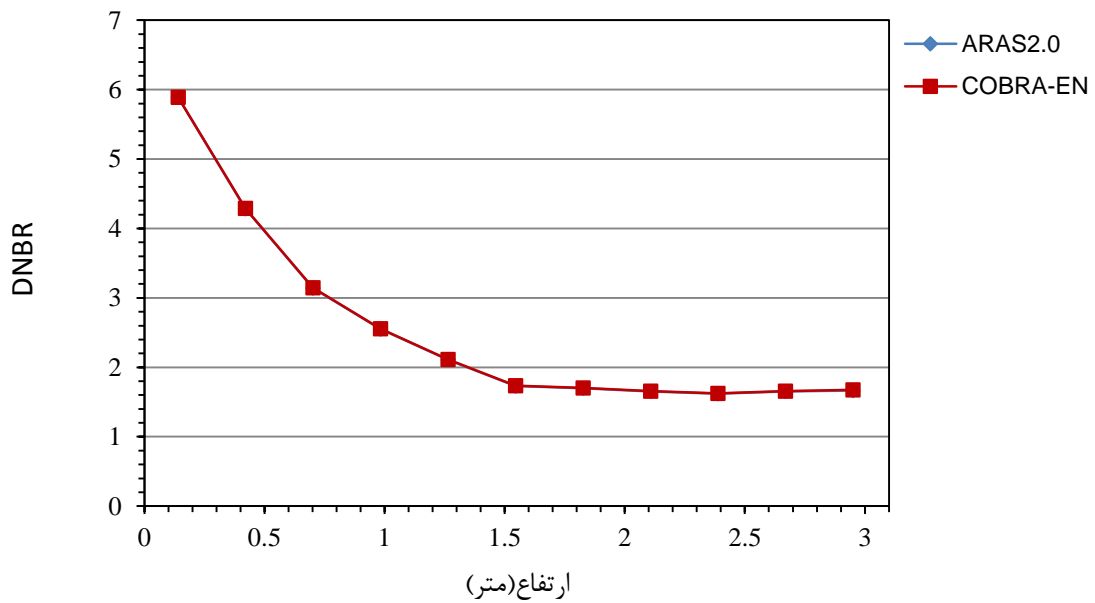
شکل ۷۷: توزیع محوری کسر خلأ در طول کانال شماره ۲ (کانال داغ)



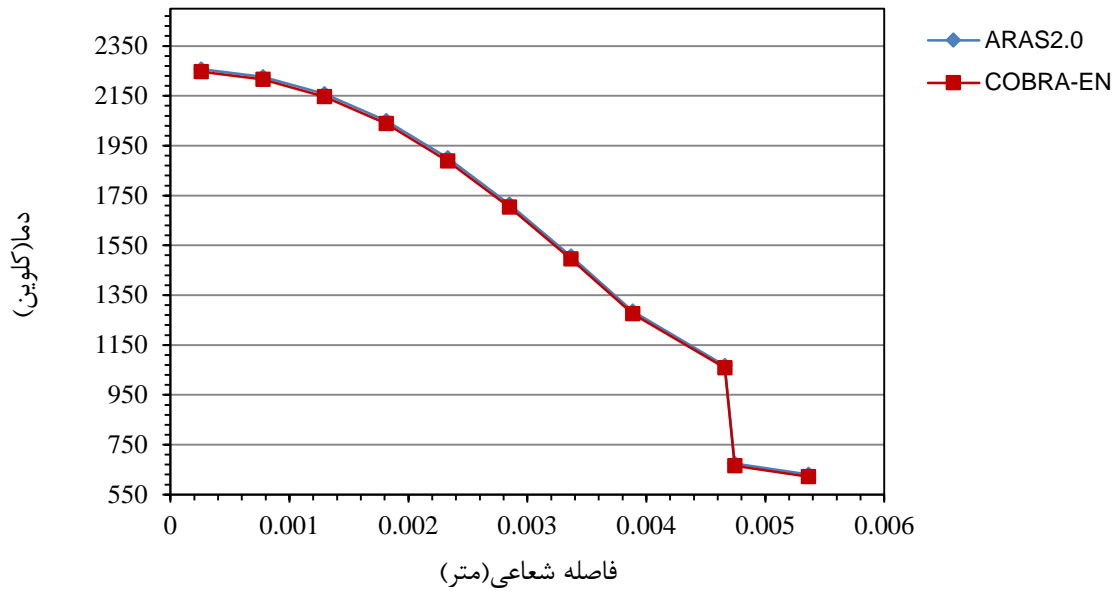
شکل ۷۸: توزیع محوری کیفیت غیر تعادلی بخار در طول کانال شماره ۲ (کانال داغ)



شکل ۷۹: توزیع محوری شار حرارتی بحرانی در طول کانال شماره ۲ (کانال داغ)

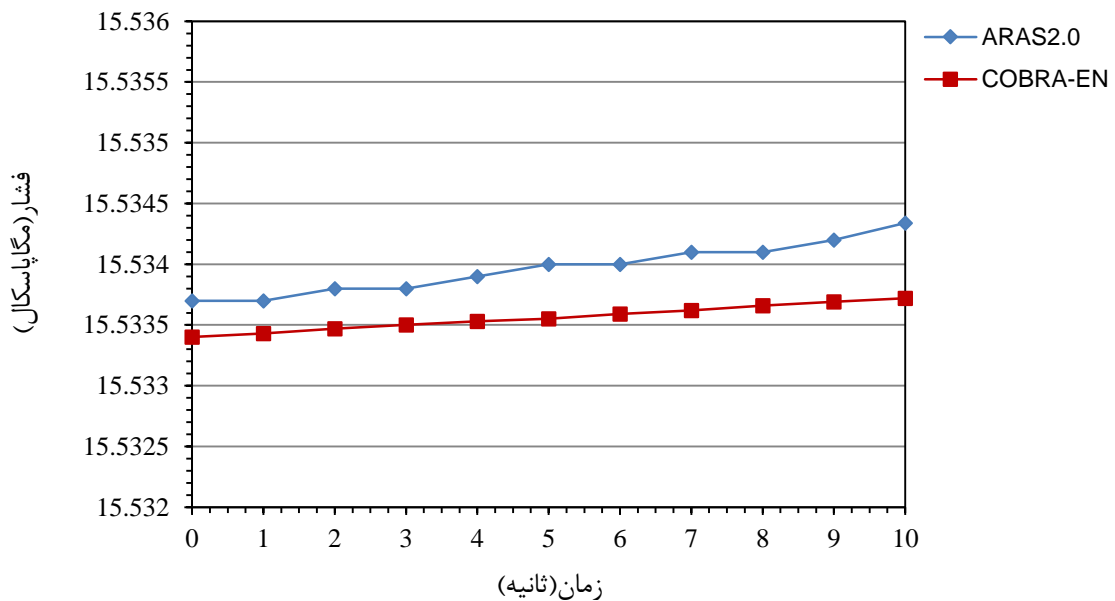


شکل ۸۰: توزیع محوری DNBR برای میله داغ

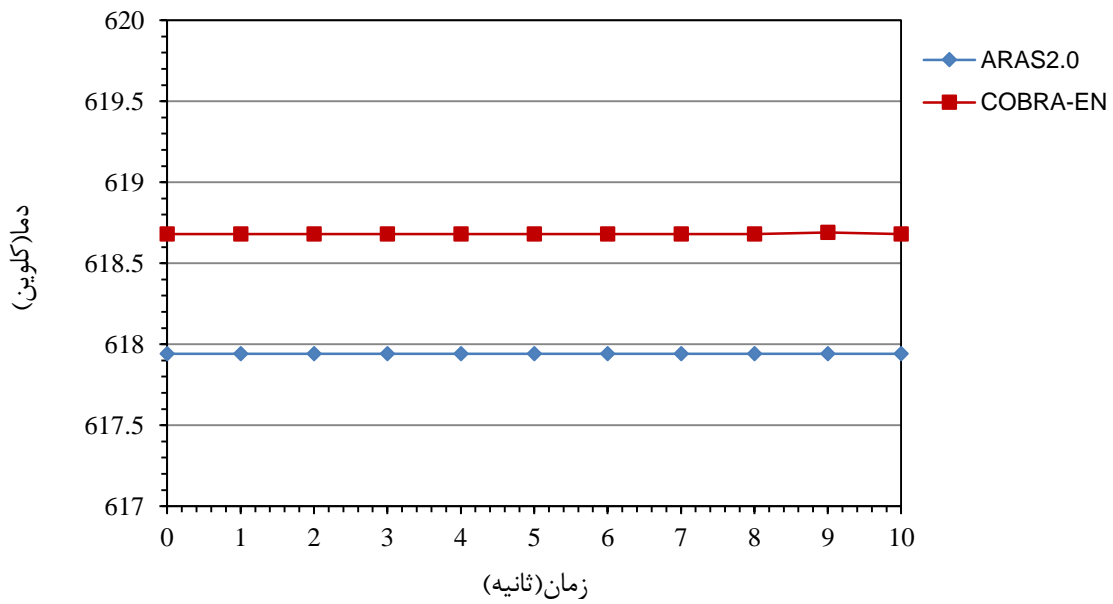


شکل ۸۱: توزیع محوری دمای سوخت برای میله داغ

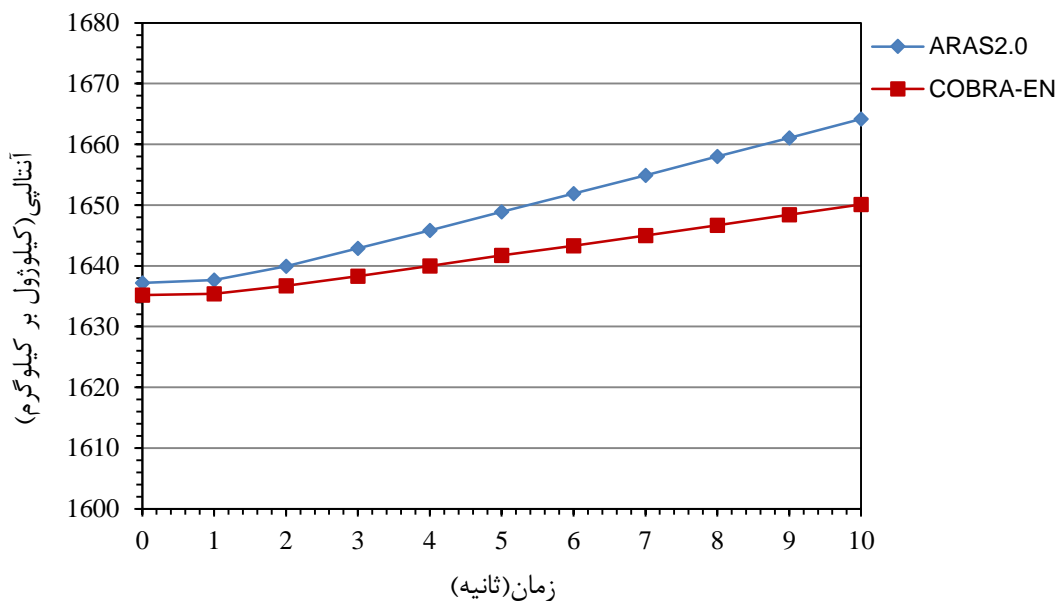
بدین ترتیب با ملاحظه نتایج ارائه شده برای کانال و میله داغ به همراه نتایج به دست آمده از کد COBRA-EN می‌توان به تطبیق نتایج در حالت پایا پی برد. برای حالت گذرا نیز در این مسئله نتایج در شکل‌های ۸۲ تا ۹۱ رسم شده است.



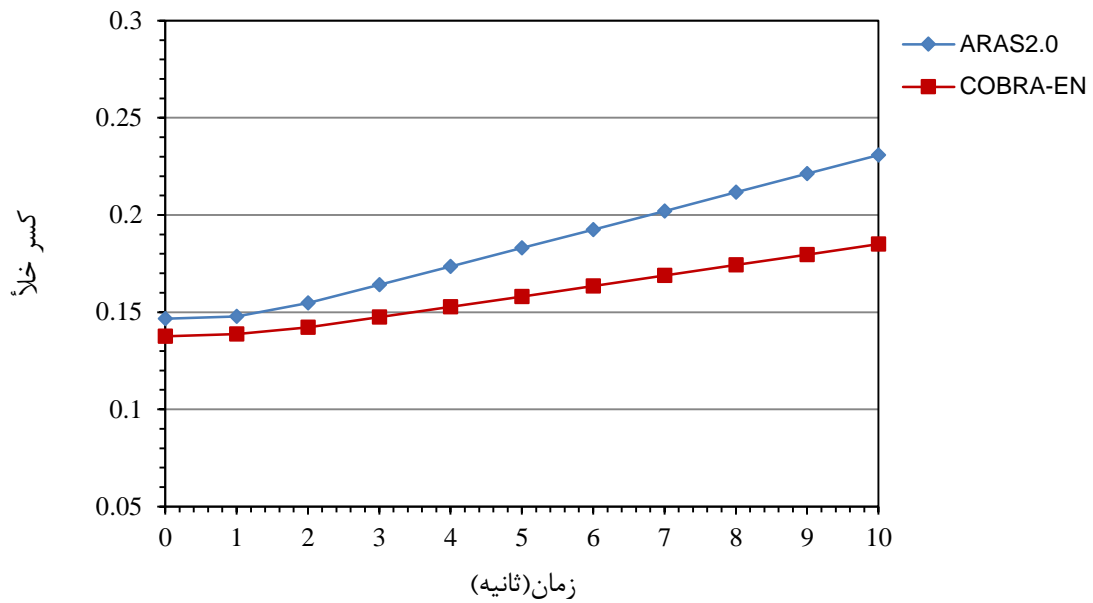
شکل ۸۲: تغییرات زمانی فشار در ورودی کانال داغ



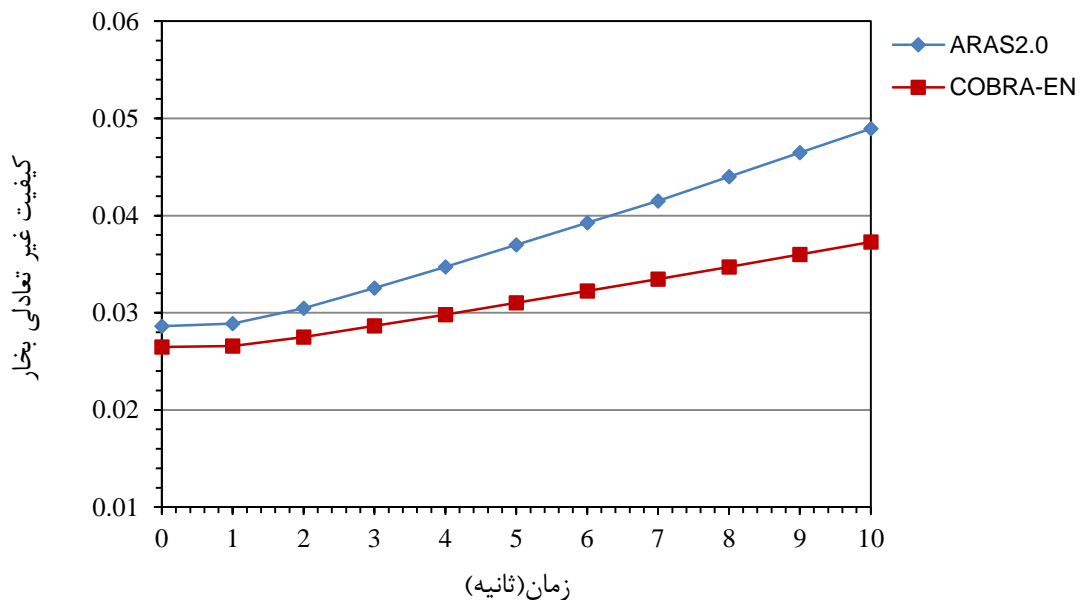
شکل ۸۳: تغییرات زمانی دمای سیال در خروجی کانال شماره ۲ (کانال داغ)



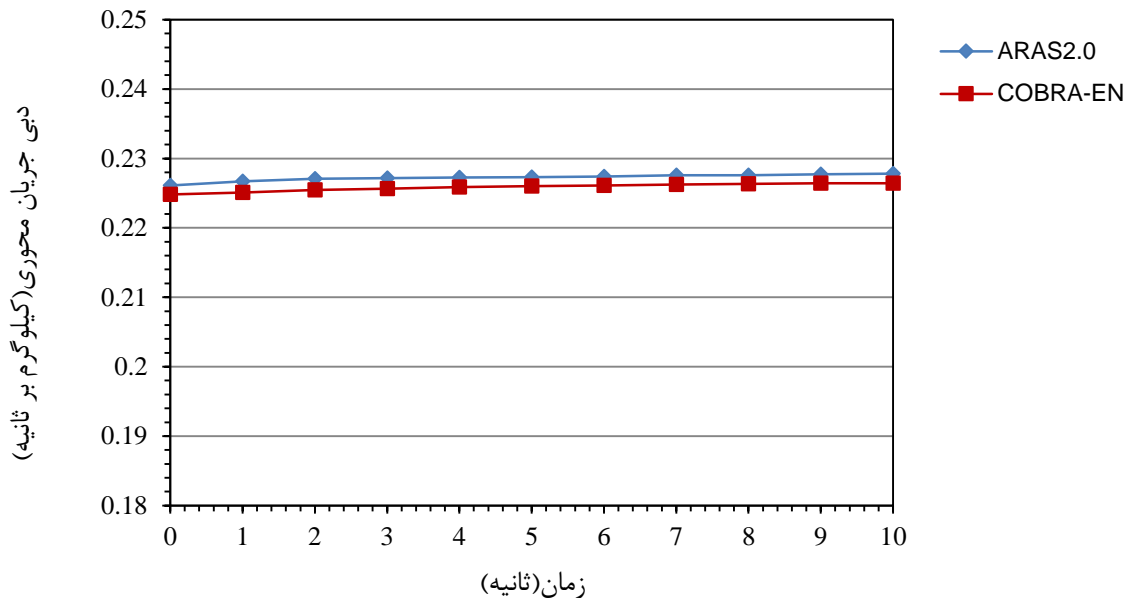
شکل ۸۴: تغییرات زمانی آنتالپی سیال در خروجی کانال شماره ۲ (کانال داغ)



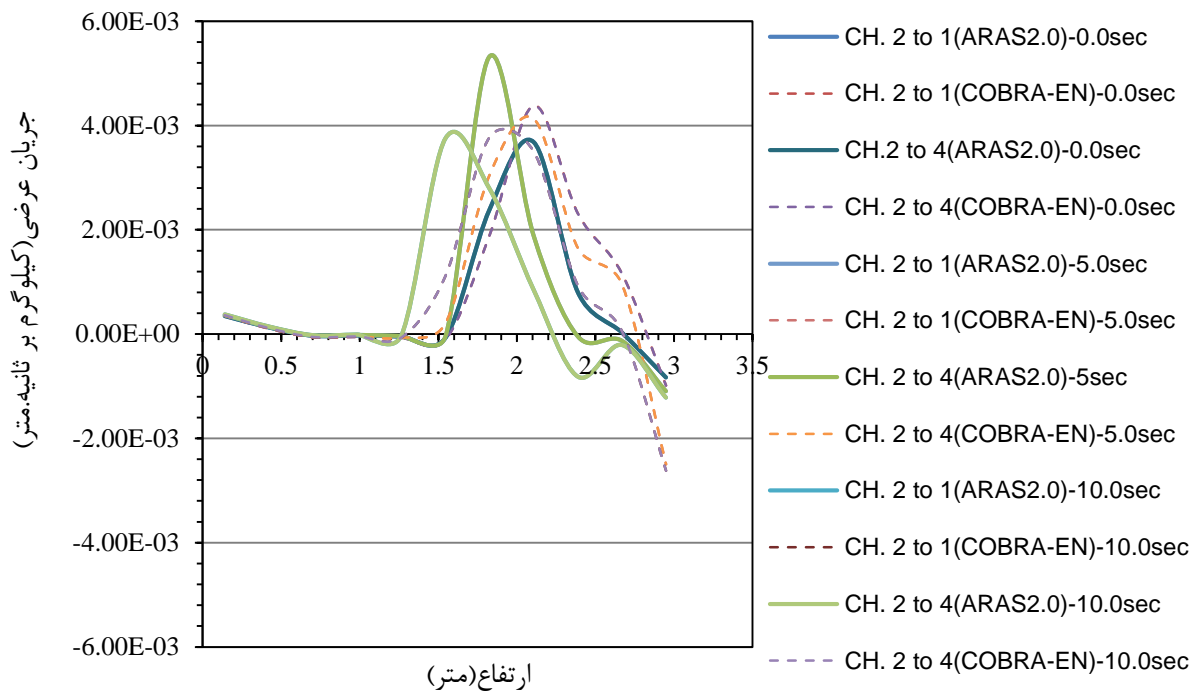
شکل ۸۵: تغییرات زمانی کسر خلأ سیال در خروجی کانال شماره ۲ (کانال داغ)



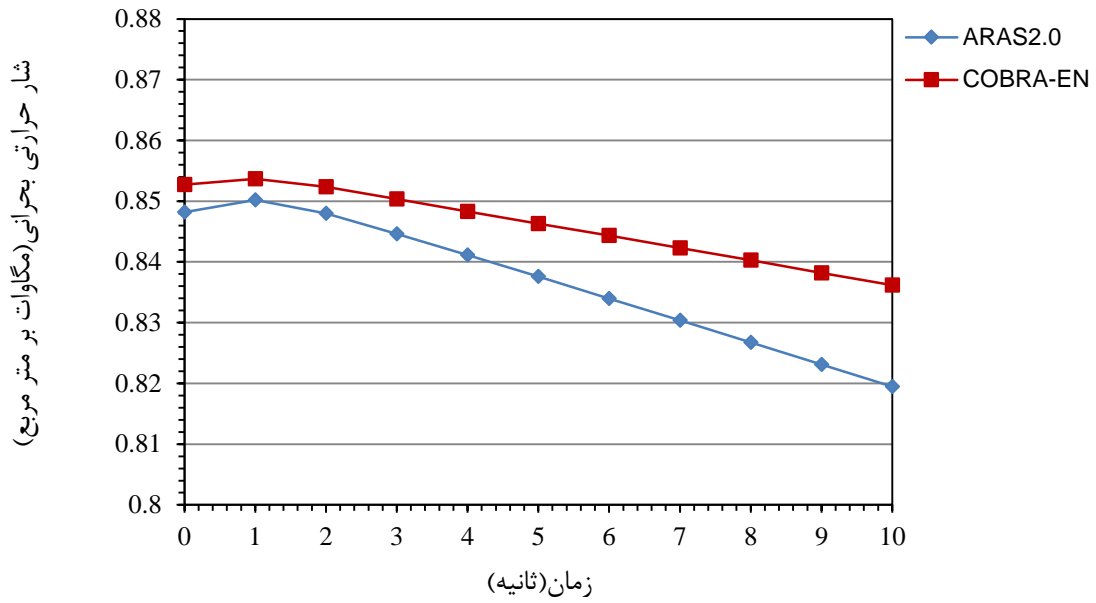
شکل ۸۶: تغییرات زمانی کیفیت غیر تعادلی بخار در خروجی کانال شماره ۲ (کانال داغ)



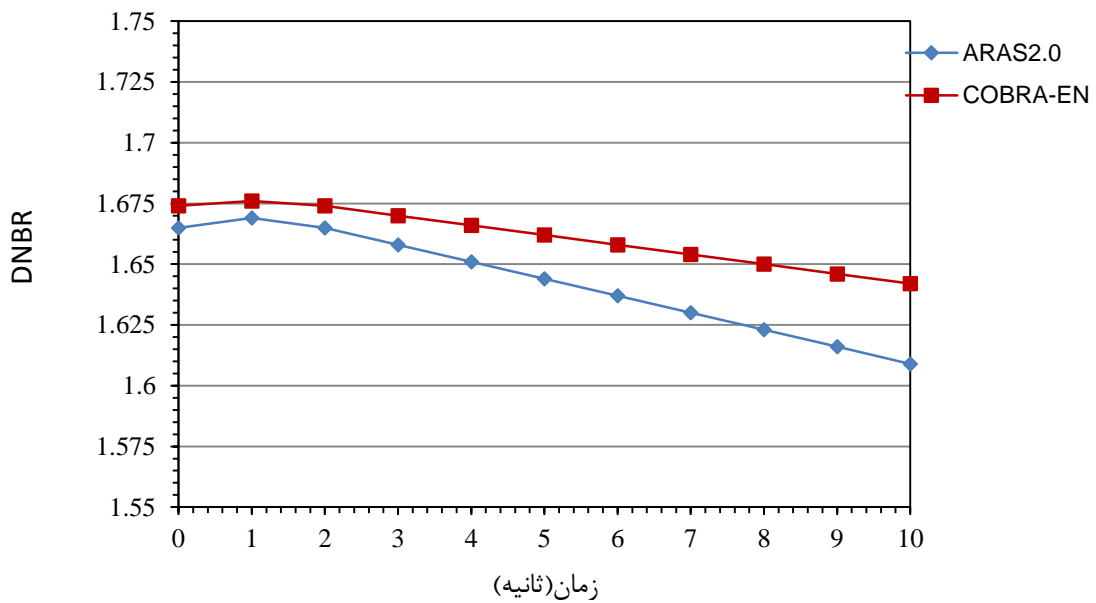
شکل ۸۷: تغییرات زمانی دبی جریان محوری سیال در خروجی کانال شماره ۲ (کانال داغ)



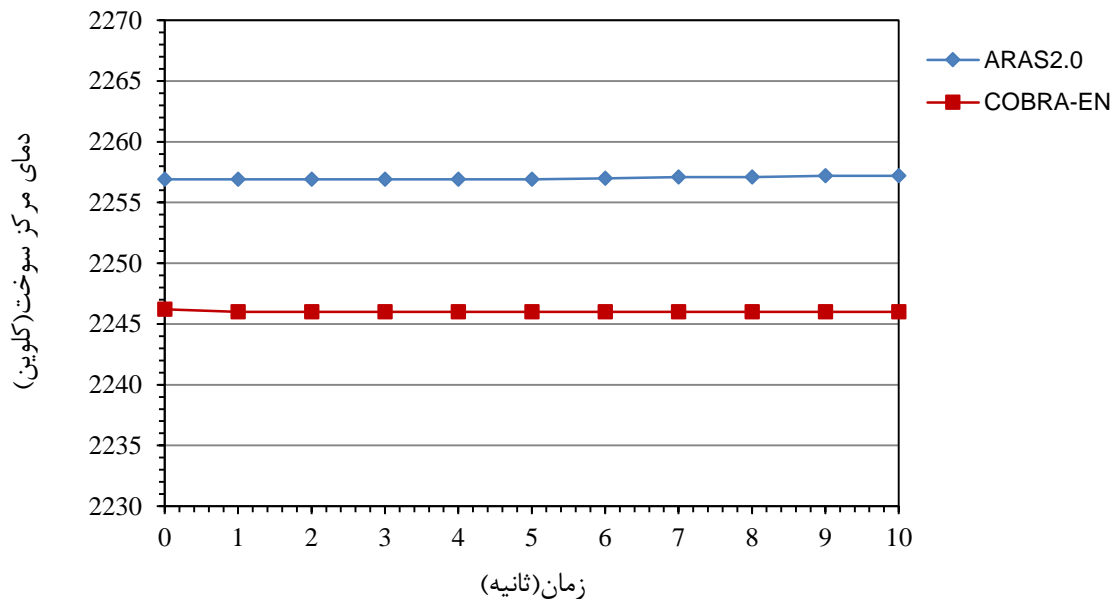
شکل ۸۸: تغییرات دبی جریان عرضی از کانال داغ به کانال‌های همسایه آن در سه مقطع زمانی در طول کانال‌ها



شکل ۸۹: تغییرات زمانی شماره حرارتی بحرانی سیال در خروجی کانال شماره ۲ (کانال داغ)



شکل ۹۰: تغییرات زمانی DNBR برای فاصله انتهایی میله داغ

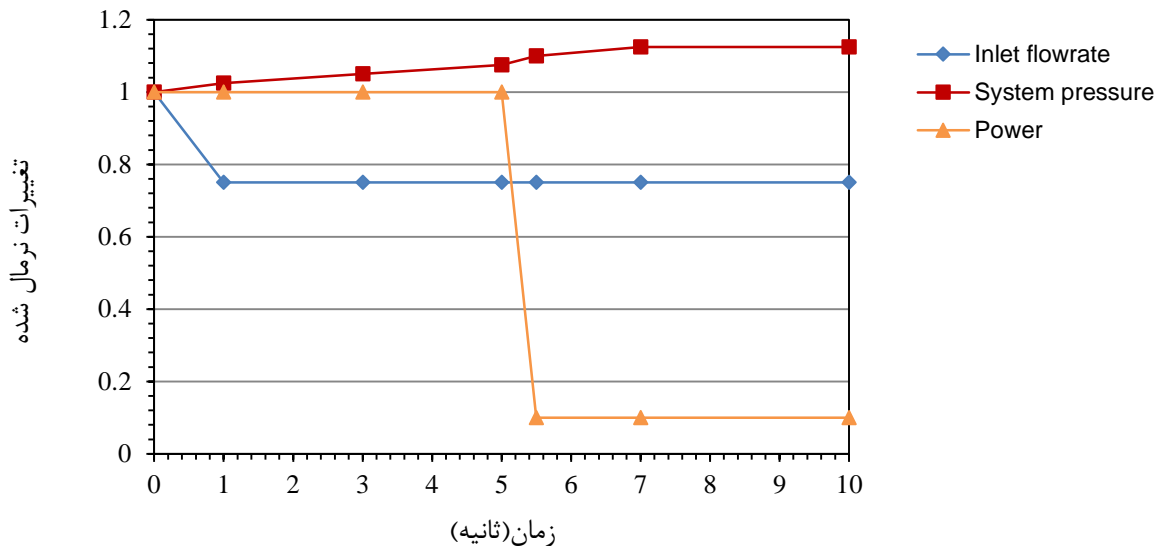


شکل ۹۱: تغییرات زمانی بیشینه دمای مرکز سوخت برای میله داغ

در حالت گذرای کاهش درجه حرارت مادون سرد، همان‌گونه که انتظار می‌رود کسر خلأ با گذر زمان افزایش می‌یابد. هرچند با توجه به تطابق خوب نتایج در حالت پایا، انتظار می‌رود که کسر خلأ در حالت گذرا نیز با همان اختلاف نسبت به نتایج به دست آمده از کد COBRA-EN تغییر کند. دلیل اصلی اختلاف مقادیر در این حالت نحوه تخمین و درونیابی دمای ورودی به کانال‌ها در کد COBRA-EN می‌باشد که با مقدار مورد نظر برای این حالت گذرا متفاوت است.

۱۰-۵- مسئله شماره ۵

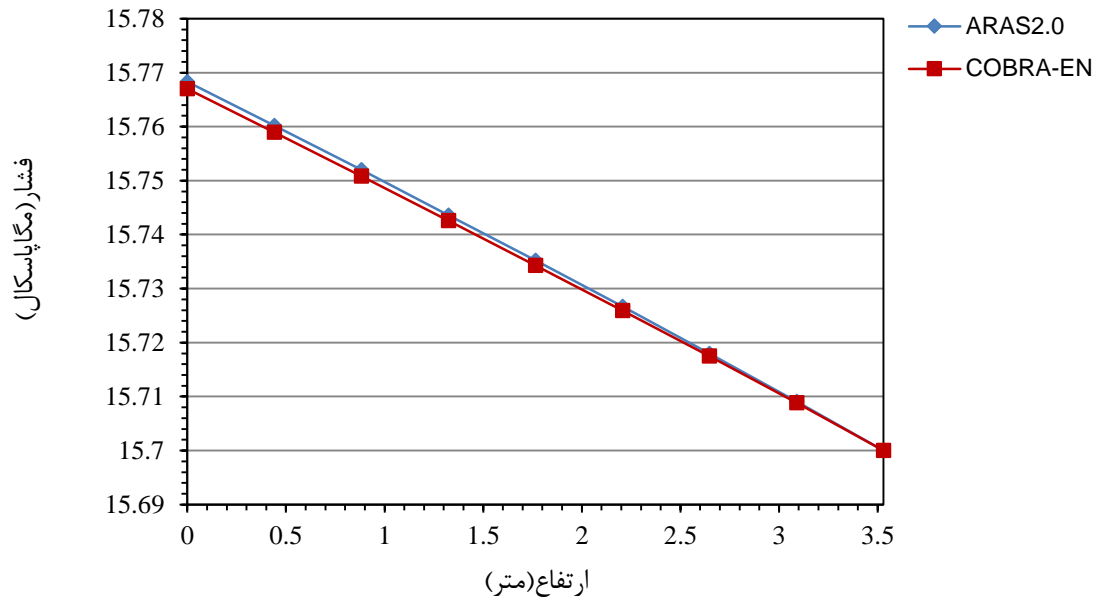
در مسئله نمونه آخر به منظور تعیین یکی از حالت‌های گذرای ترکیبی فرض می‌گردد که همزمان در حالتی که دبی سیستم کاهش می‌یابد، فشار افزایش و توان تولیدی در میله سوخت نیز کاهش یابد (شکل ۹۲). برای بررسی این مسئله، آرایشی متشکل از ۱۹ میله سوخت شش وجهی و ۲۴ کانال با مشخصات ارائه شده در جدول (۷) انتخاب شده است. نتایج مورد نظر در این حالت پایا و گذرا در شکل‌های ۹۳ تا ۱۰۱ نمایش داده شده است.



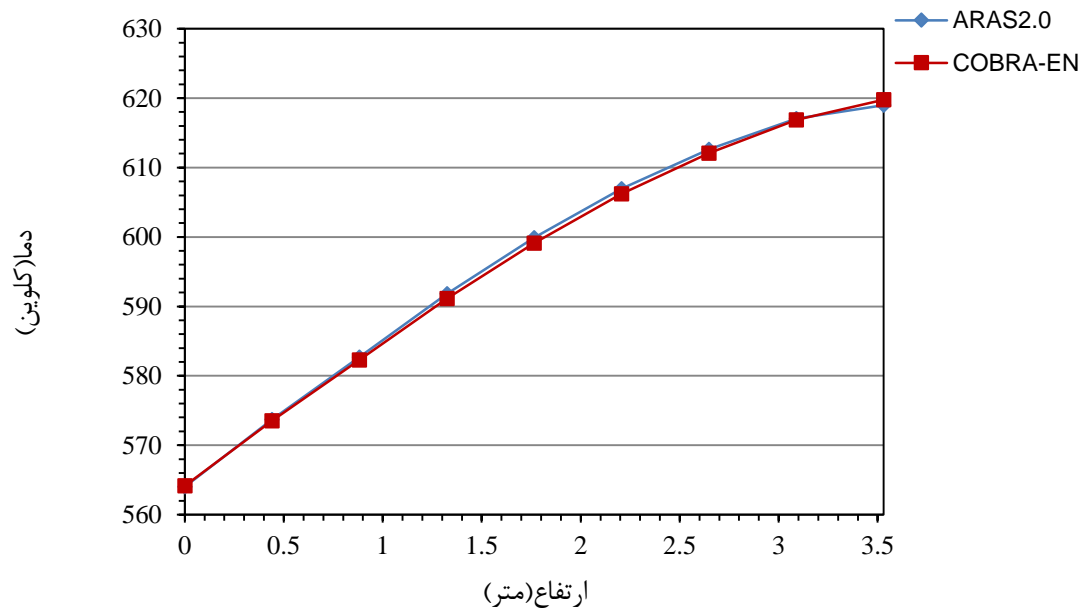
شکل ۹۲: نحوه تغییرات نرمال شده پارامترهای حالت گذرا

جدول شماره ۷: مشخصات مسئله شماره ۵

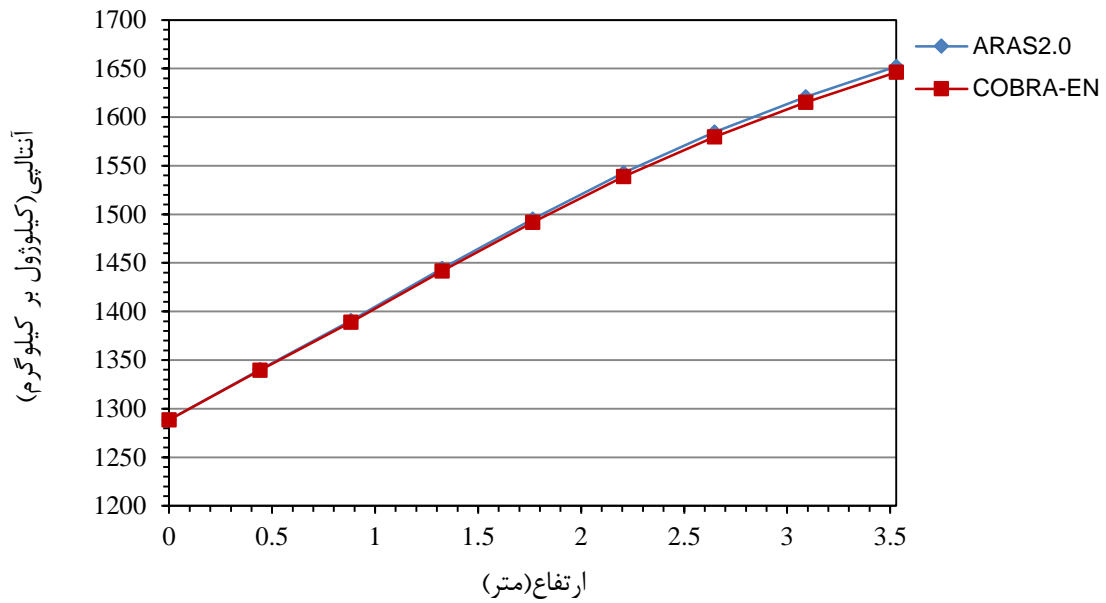
شماره	پارامتر	مقدار
۱	دبی جرمی ورودی هر کانال (کیلوگرم بر ثانیه)	۰/۱۲۸۷۶
۲	دمای ورودی (کلوین)	۵۶۴
۳	فشار خروجی (مگاپاسکال)	۱۵/۷
۴	تعداد تقسیمات محوری	۸
۵	تعداد تقسیمات شعاعی سوخت	۹
۶	قطر داخلی سوخت (متر)	۰/۰۰۱۵
۷	قطر خارجی سوخت (متر)	۰/۰۰۷۵۷
۸	ضخامت گپ (متر)	۰/۰۰۰۰۸۵
۹	قطر خارجی غلاف (متر)	۰/۰۰۹۱
۱۰	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
۱۶	اندازه گام (متر)	۰/۰۱۲۷۵
۱۷	طول میله سوخت (متر)	۳/۵۳



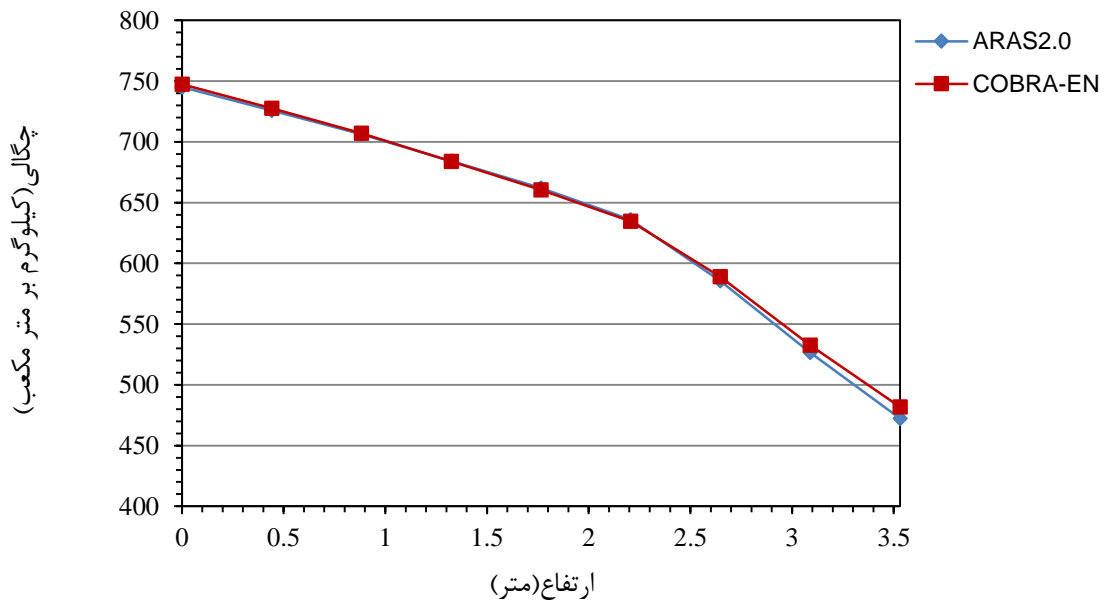
شکل ۹۳: توزیع محوری فشار در طول کانال داغ



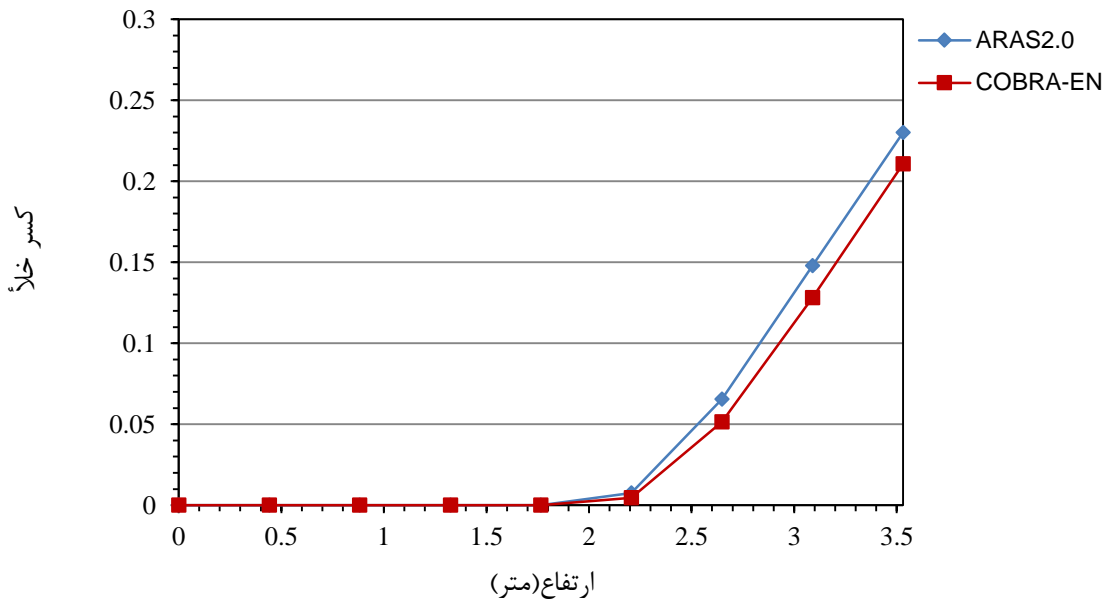
شکل ۹۴: توزیع محوری دمای سیال در طول کانال شماره ۹ (کانال داغ)



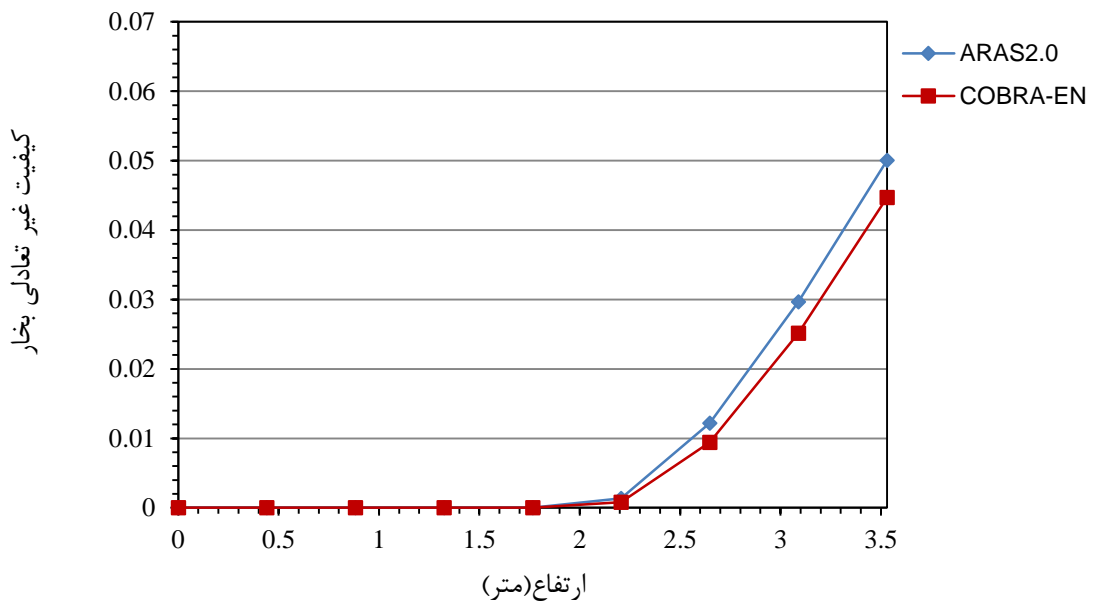
شکل ۹۵: توزیع محوری آنتالی سیال در طول کانال شماره ۹ (کانال داغ)



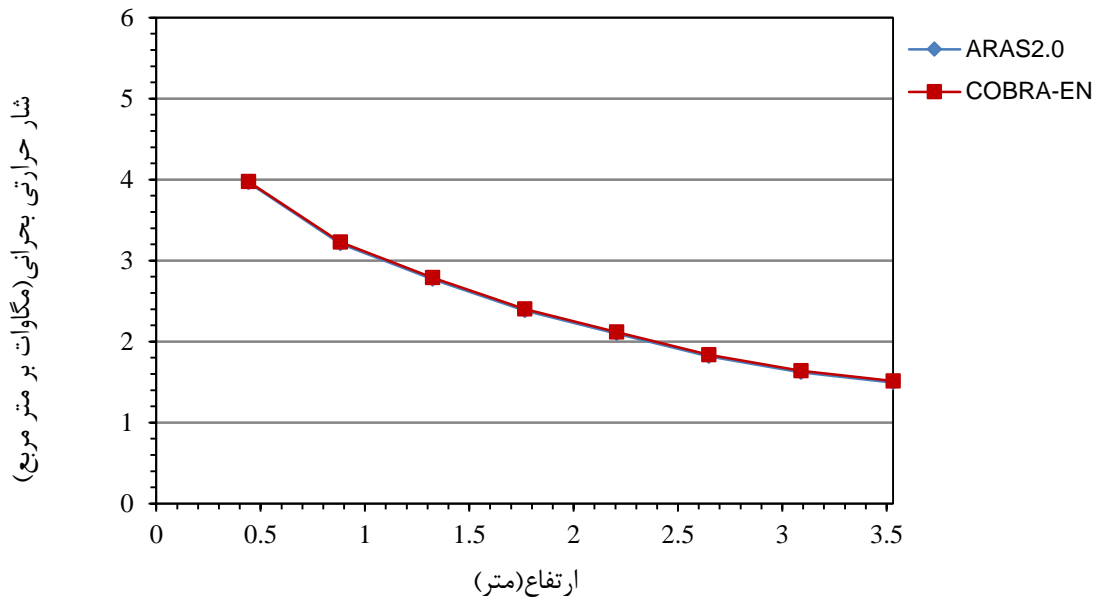
شکل ۹۶: توزیع محوری چگالی سیال در طول کانال شماره ۹ (کانال داغ)



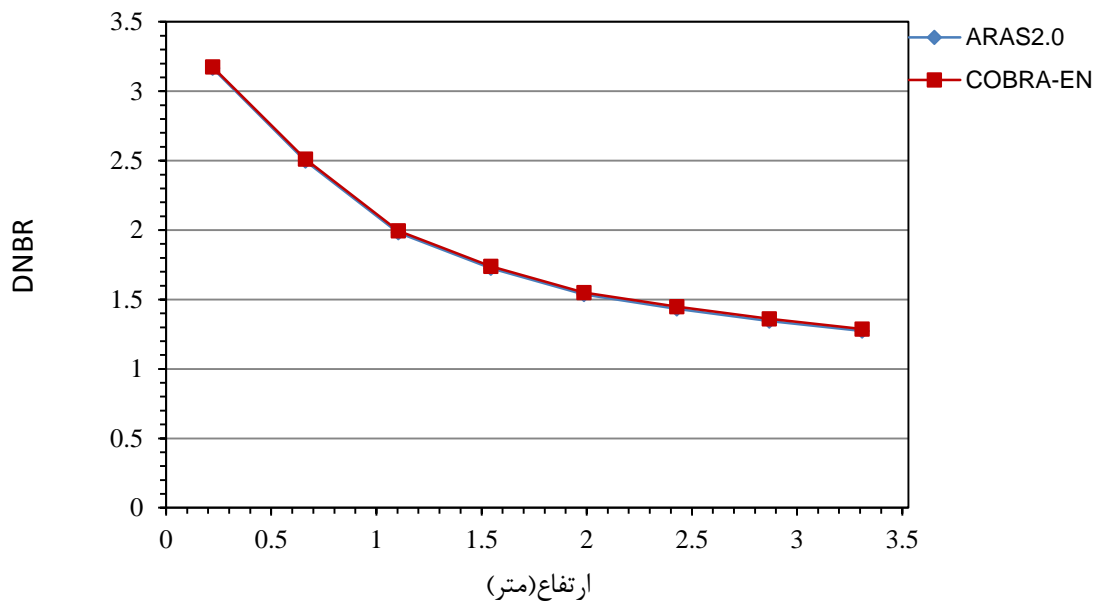
شکل ۹۷: توزیع محوری کسر خلأ در طول کانال شماره ۹ (کانال داغ)



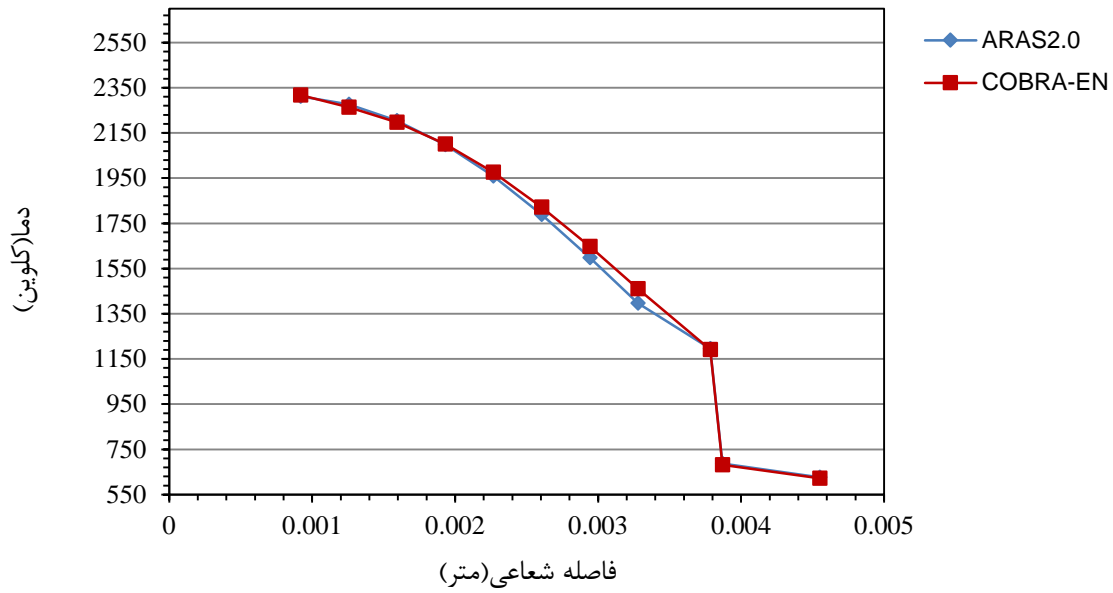
شکل ۹۸: توزیع محوری کیفیت غیر تعادلی بخار در طول کانال شماره ۹ (کانال داغ)



شکل ۹۹: توزیع محوری شار حرارتی بحرانی در طول کانال شماره ۹ (کانال داغ)

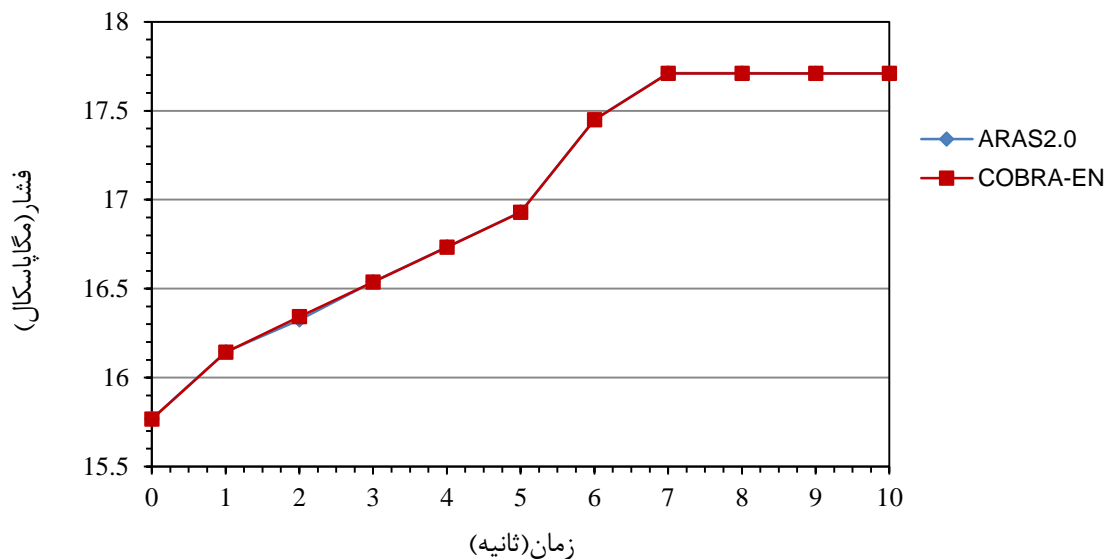


شکل ۱۰۰: توزیع محوری DNBR برای میله داغ

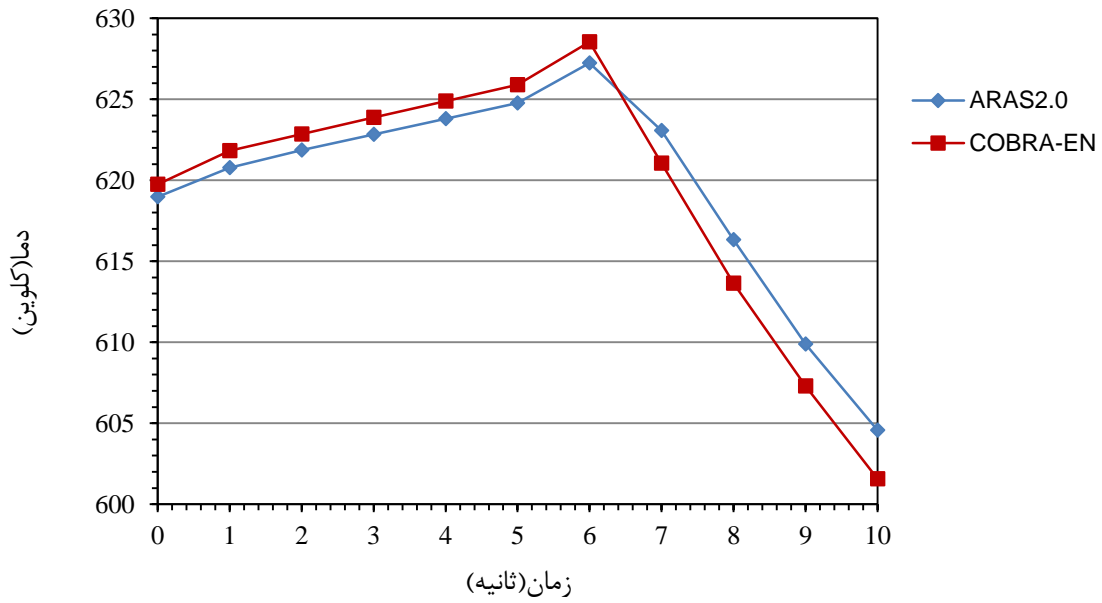


شکل ۱۰۱: توزیع محوری دمای میله سوخت برای میله داغ

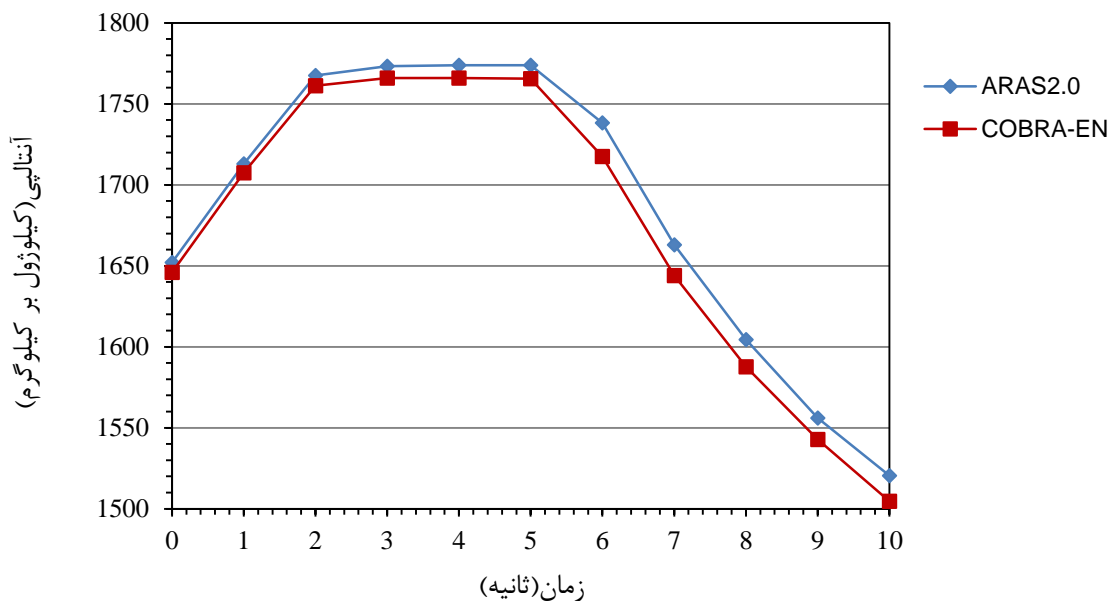
در نتایج به دست آمده در حالت پایا، جریان در کانال داغ دوفازی بوده و کسر خلأ مخالف صفر می‌باشد. همچنین در طول کانال دمای سیال افزایش یافته و در انتهای کانال در حالت اشباع خارج گردیده است. در نهایت نتایج این مسئله در حالت گذرا در شکل‌های ۱۰۲ تا ۱۱۱ رسم شده است.



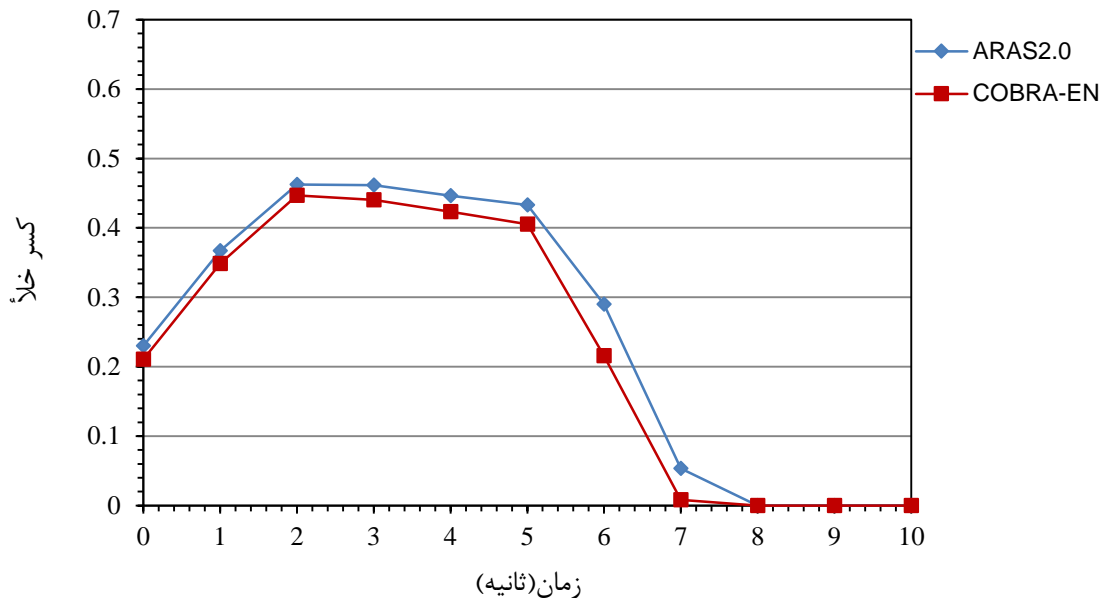
شکل ۱۰۲: تغییرات زمانی فشار در ورودی کانال داغ



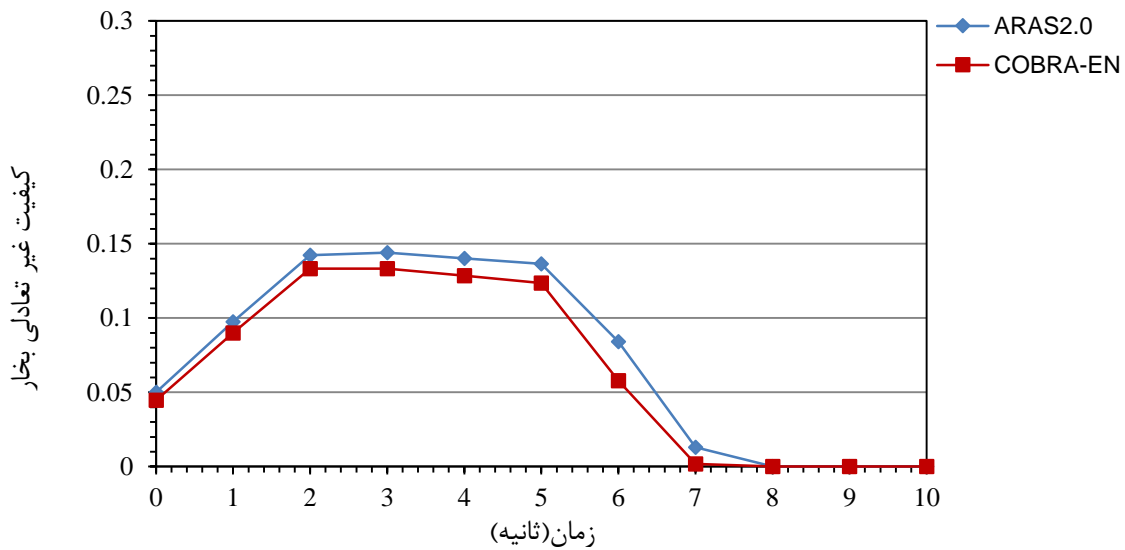
شکل ۱۰۳: تغییرات زمانی دمای سیال در خروجی کانال شماره ۹ (کانال داغ)



شکل ۱۰۴: تغییرات زمانی آنتالپی سیال در خروجی کانال شماره ۹ (کانال داغ)



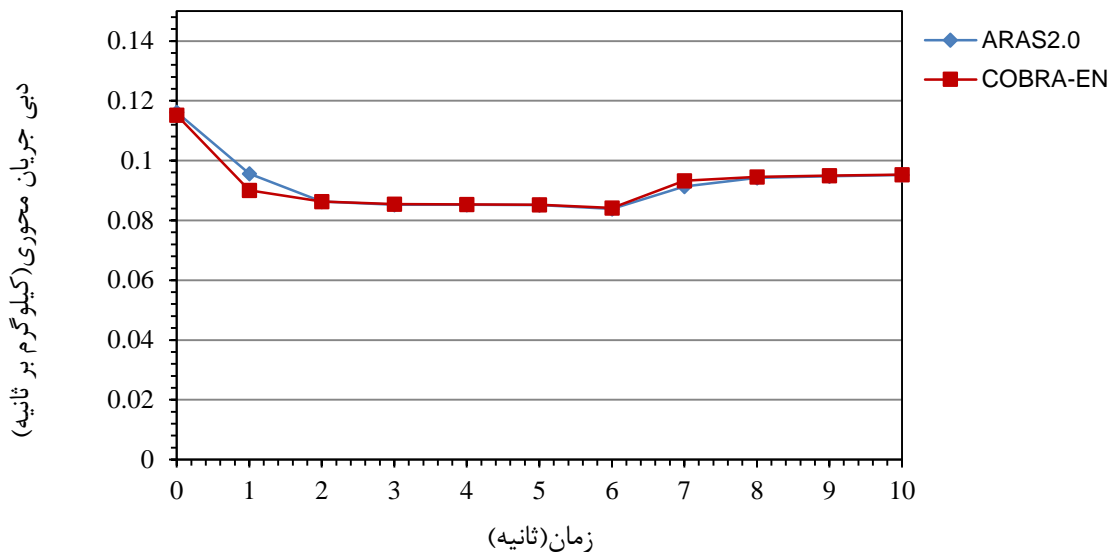
شکل ۱۰۵: تغییرات زمانی کسر خلأ در خروجی کانال شماره ۹ (کانال داغ)



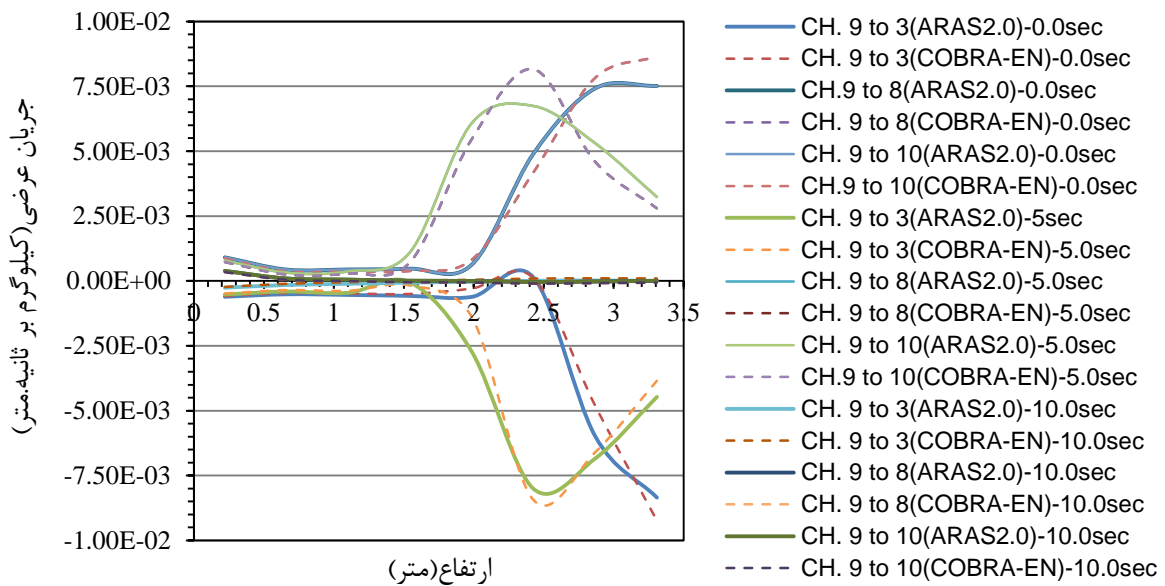
شکل ۱۰۶: تغییرات زمانی کیفیت غیر تعادلی بخار در خروجی کانال شماره ۹ (کانال داغ)

در حالت گذرای مورد نظر برای این مسئله می‌توان مشاهده نمود که ابتدا با ثابت ماندن توان تولیدی و کاهش دبی جریان ورودی به کانال‌ها و افزایش ناچیز فشار خروجی، کسر خلأ افزایش می‌یابد و پس از آن با توجه به ثابت ماندن دبی جریان و همچنین توان تولیدی تا ثانیه ۵/۵ از شروع حالت گذرا تقریباً پارامترهای سیال تغییر چندانی نمی‌کنند

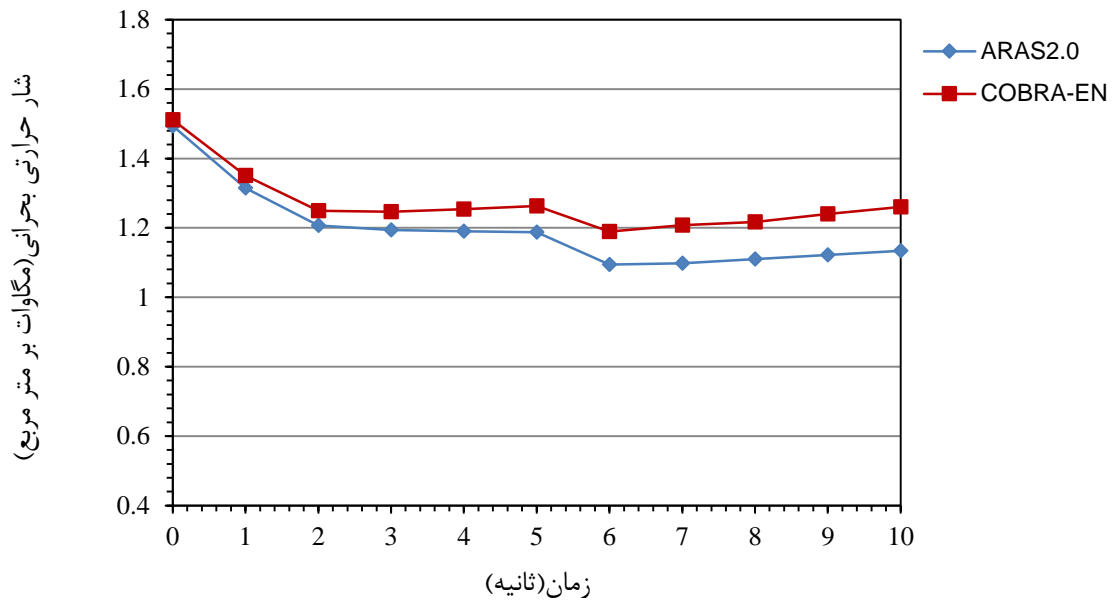
تا زمانی که توان به ۰/۱ مقدار اولیه خود برسد که در این لحظه پارامترهای سیال مانند کسر خلأ کاهش چشمگیری می‌یابد تا نهایتاً جریان سیال تک‌فازی گردد.



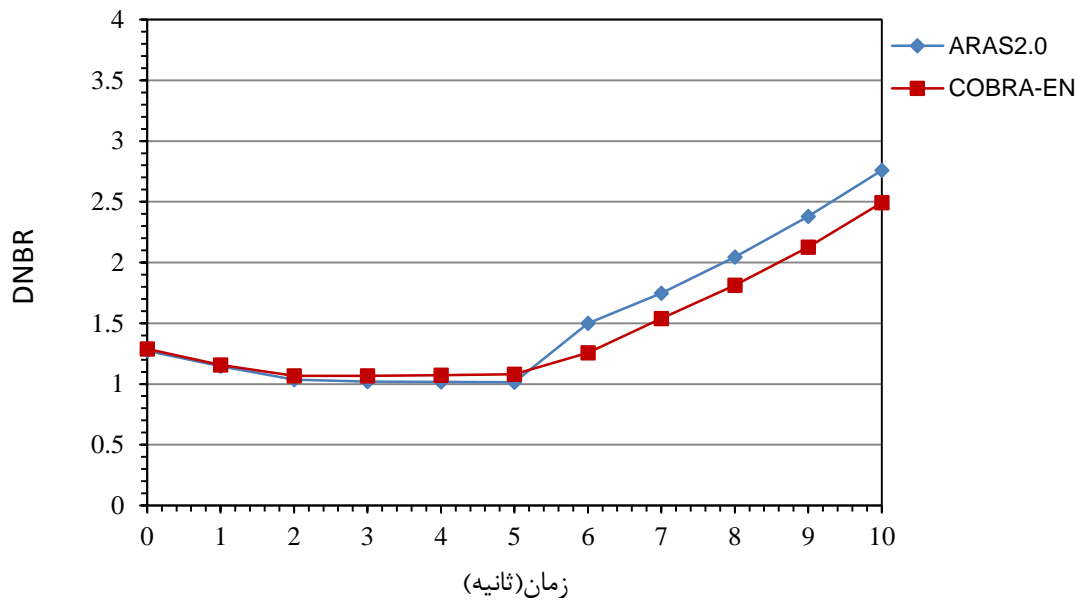
شکل ۱۰۷: تغییرات زمانی دبی جریان محوری در خروجی کانال شماره ۹ (کانال داغ)



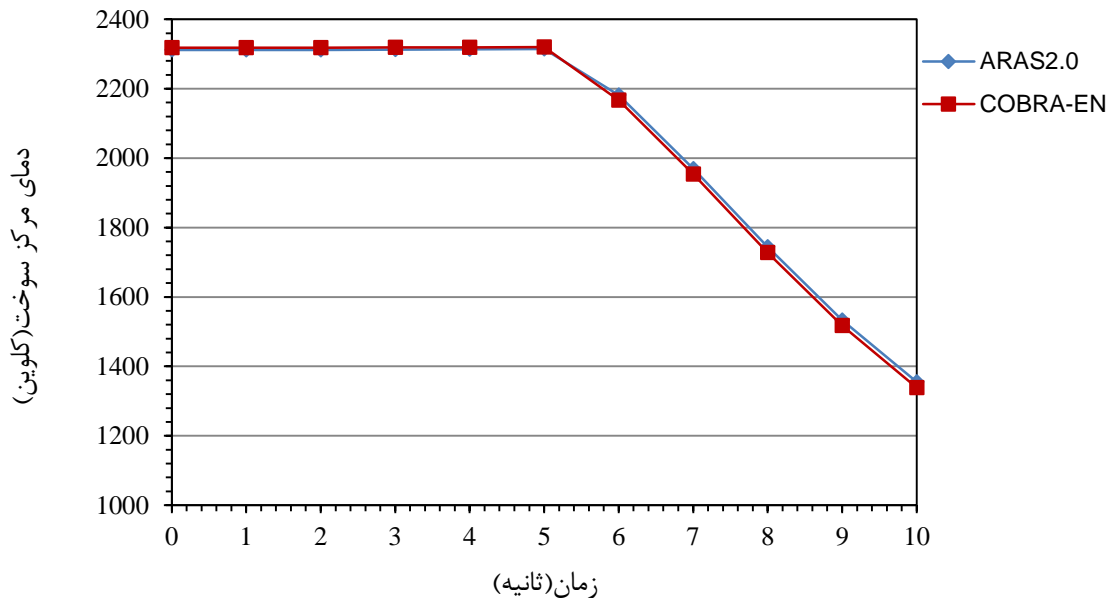
شکل ۱۰۸: تغییرات دبی جریان عرضی از کانال داغ به کانال‌های همسایه آن در سه مقطع زمانی در طول کانال‌ها



شکل ۱۰۹: تغییرات زمانی شار حرارت بحرانی در خروجی کانال شماره ۹ (کانال داغ)



شکل ۱۱۰: تغییرات زمانی DNBR برای میله داغ



شکل ۱۱۱: تغییرات زمانی بیشینه دمای مرکز سوخت برای میله داغ

همچنین در نتایج حالت گذرای مورد نظر، با توجه به تأثیر بیشتر دمای سوخت از توان تولیدی در قرص سوخت، مشاهده می‌شود که با کاهش توان تولیدی، دمای سوخت کاهش می‌یابد.

۱۱- نتیجه‌گیری

در این گزارش، تئوری و مهم‌ترین ویژگی‌های کد محاسباتی ARAS2.0 که بر اساس مدل زیرکانال در حالت گذرا و در محیط فرتن توسعه داده شده است، ارائه گردیده تا بتوان به کمک آن محاسبات آرایه‌ای از میله‌های سوخت را در یک راکتور به صورت مثلثی و مربعی مدل‌سازی نمود. همچنین برای مقایسه نتایج بدست آمده از کد در حالت دوفازی، 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. لازم به ذکر است این کد تمامی خصوصیات کد پیشین ARAS1.0 را دارا می‌باشد. این خصوصیات به انضمام برخی از ویژگی‌های اضافه شده به کد ARAS1.0 عبارتند از:

- محاسبات انجام شده در کد ARAS2.0 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 برای راکتورهای آب سبک تحت فشار، که در برخی شرایط ممکن است با مقدار کمی کسر خلأ در فواصل محوری انتهایی کانال در حالت پایا و گذرهای خفیف روبرو شوند، معمولاً این مدل می‌تواند منجر به نتایج مطلوبی گردد.

- از جمله ویژگی‌های دیگر کد ARAS2.0، 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 ARAS2.0، 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 ARAS2.0 می‌توان تعداد دلخواهی از نگهدارنده‌های سوخت تا حداکثر ۲۰ عدد را به کار گرفت.
- کد ARAS2.0 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 ARAS2.0 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.
- محاسبات حالت گذرای کد ARAS2.0 به صورت کاملاً ضمنی انجام شده که به کمک آن می‌توان با بازه‌های زمانی بزرگتر نیز به جواب رسید. این کد محاسبات حالت گذرای دبی جریان ورودی، دمای سیال ورودی، توان تولیدی در قرص سوخت و فشار خروجی را به صورت مجزا و ترکیبی انجام می‌دهد.
- یکی از ویژگی‌های کد ARAS2.0، مربوط به مدل‌سازی خواص حرارتی در سوخت و غلاف است که علاوه بر تغییر این پارامترها وابسته به دما می‌توان آنها را به صورت مقادیر ثابت نیز در نظر گرفت.

- کد ARAS2.0 امکان مدل‌سازی فواصل محوری متفاوت در طول یک کانال را دارا می‌باشد که این قابلیت در کد ARAS1.0 وجود نداشت.

۱۲- مراجع

1. Basile, D., Beghi, M., Chierici, R., Salina, E., and Brega, E., "COBRA-EN manual, an upgraded version of the COBRA-3C/MIT Code for thermal-hydraulic transient analysis of light water reactor fuel assemblies and cores", ENELCRTN, 1999.
2. Todreas, N.E., Kazimi, M.S., "Nuclear System-II, Elements of Thermal Hydraulic Design", Taylor and Francis, 1990.
3. Todreas, N.E., Kazimi, M.S., "Nuclear Systems I, Thermal Hydraulic Fundamentals", Taylor & Francis, 2nd edition, 1993.
4. Martinelli, R.C., Nelson, D.B., "Prediction of pressure drop during forced circulation boiling of water", Transaction of ASME 70, pp. 695, 1948.
5. Dittus, F.W., Boelter, L.M.K., "heat transfer in automobile radiators of the tubular type", Berkeley, University of California Press, 1930.
6. 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.
7. Lellouche, G.S., Zolotar, L.A., "Mechanistic model for predicting two-phase void fraction for water in vertical tubes", channels and rod bundles, Electric Power Research Institute, NP-2246.SR, 1982.
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.