

انتقال حرارت ترکیبی جابجایی و تشعشعی در میله سوخت داغ قلب راکتور هسته ای

چکیده: در این مقاله به بررسی انتقال حرارت ترکیبی جابجایی همراه با تشعشع در میله سوخت داغ استوانه ای شکل قلب یک راکتور هسته ای تحت فشار مانند راکتور بوشهر پرداخته شده است. به طور کلی در آنالیز حرارتی یک میله سوخت، توجه ویژه ای به توزیع درجه حرارت در اجزاء تشکیل دهنده میله سوخت و همچنین تأثیر جریان سیال اطراف آن بر میزان برداشت حرارت معطوف می گردد. لذا در این مطالعه با استفاده از معادلات انتقال حرارت در سوخت و سیال مجاور آن، میزان شدت انتقال حرارت جابجایی و تابشی و تأثیر پارامترهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. در این مدل سازی از فرض محیط خاکستری برای مدل سازی تشعشع در فضای بین سوخت و غلاف و همچنین در نظر گرفتن دیواره های مات استفاده شده است و مدل تشعشع به کار گرفته شده مدل جهات مجزا (DOM) می باشد. برای این شبیه سازی از نرم افزار انسیس فلوئنت (تحلیل عددی) بهره گرفته شده است و نتایج حاصل از این شبیه سازی با نتایج مراجع موجود مقایسه و تاثیر انتقال حرارت تشعشعی در میله سوخت هسته ای بررسی شده است.

واژه های راهنما: راکتورهای قدرت هسته ای، میله سوخت داغ، ترموهیدرولیک، انتقال حرارت جابجایی، تشعشع، تک کانال، تحلیل عددی

فرزاد

چوبدار رحیم^۱

دانشجوی دکتری،

دانشکده مهندسی

مکانیک، دانشگاه صنعتی

ارومیه، ارومیه، ایران

محمدباقر

محمدصادقی

آزاد^{*۲}

دانشیار، دانشکده مهندسی

مکانیک، دانشگاه شهید

مدنی آذربایجان، تبریز،

ایران

مقاله علمی پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۱

پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۰

Farzad Choobdar
Rahim

PhD Student, Department
of Mechanical
Engineering, Urmia
University of Technology,
Urmia

Mohammad Bagher
Mohammad
Sadeghi Azad*

Associate Professor,
Department of
Mechanical
Engineering, Azarbaijan
Shahid Madani
University,
Tabriz

Combined convection and radiation heat transfer in the hot fuel rod in the nuclear reactor core

Abstract: In this paper, the combined convection heat transfer with radiation in the hot fuel rod of a pressurized nuclear reactor like the Bushehr reactor has been investigated. Generally, in the thermal analysis of a fuel rod, special attention is paid to the temperature distribution in the constituent parts of the fuel rod, as well as the effect of the fluid flow around it on the amount of heat removal. Therefore, in this study, using heat transfer equations in the fuel and its adjacent fluid, the intensity of convection and radiation heat transfer and the effect of different parameters have been investigated. In this modeling, the assumption of gray environment is used to model the radiation in the space between the fuel and the clad, as well as considering the opaque walls, and the radiation model used is the Discrete Direction Model (DOM). Ansys Fluent (CFD) software has been used for this simulation.

Keywords: Nuclear power reactors, Hot fuel rod, Thermo-hydraulics, Convection heat transfer, Radiation, Single channel, CFD

۱- مقدمه

آجی‌پیده و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۱۰] به بررسی اثرات ویسکوزیته دینامیکی و تابش حرارتی غیرخطی بر جریان همرفتی آزاد از طریق یک کانال متخلخل عمودی پرداختند. هدف این مطالعه یافتن اثرات احتمالی تغییر ویسکوزیته و تابش حرارتی غیرخطی بر ویژگی‌های جریان سیال بود. برای انجام این کار، از انتشار حرارت غیرخطی روزلند و ویسکوزیته دینامیکی سیال برای تجزیه و تحلیل تشکیل جریان استفاده کردند که در نتیجه معادلات جریان غیرخطی زیادی را به همراه دارد. به همین دلیل، یک روش حل نیمه تحلیلی که معمولاً به نام روش تجزیه آدومین (ADM) نامگذاری شده است، برای تقسیم معادلات به صورت سری استفاده می‌شود که پس از آن شبیه‌سازی کامپیوتری برای حل نهایی معادلات به کار گرفته می‌شود. نتایج تحت تأثیر پارامترهای مورد نظر بر روی سرعت، دما، عدد ناسلت و اصطکاک سطح محاسبه، ارائه و مورد بحث قرار می‌گیرند. که در نهایت، نتایج به‌دست‌آمده در این پژوهش با استفاده از مطالعه منتشر شده توسط سینگ و پل در سال ۲۰۰۶ [۱۱] مقایسه و تأیید شده‌اند.

روچیکا مهتا و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۱۲] به بررسی تأثیرات تابش و تولید گرما در جریان همرفتی مختلف MHD وابسته به زمان نانوسیالات در امتداد یک کانال عمودی منتهی به محیط نفوذپذیر پرداختند. در این پژوهش انواع چهارگانه نانوسیال در نظر گرفته شد (i) آب - مس (ii) آب - نقره (iii) آب - Al_2O_3 (iv) آب - TiO_2 ، آب به عنوان سیال اصلی همرفتی در نظر گرفته می‌شود و عناصر Cu ، Ag ، Al_2O_3 ، TiO_2 در این سیال پایه ترکیب می‌شوند. تأکید پژوهش انجام شده بر مطالعه ریاضی تطبیقی جریان همرفت مختلط MHD چهار نوع نانوسیال است. این مطالعه تطبیقی در حضور محیط متخلخل، تولید گرما و اثر تشعشع انجام شده است.

علی صفوی‌نژاد و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۱۳] به بررسی و تحلیل مسئله انتقال حرارت ترکیبی (اجباری و طبیعی) و تابش بین دو صفحه موازی (کانال) با دیواره‌های همدمما به صورت عددی پرداختند. برای این منظور باید معادلات تکانه، انرژی و انتقال تابش حل گردند. در این تحقیق از روش بولتزمن شبکه ای برای حل تمامی معادلات به طور همزمان استفاده شده است که برای افزایش پایداری حل معادله انرژی به روش شبکه بولتزمن، از رویکردی مدرن به نام مدل دو زمان آرامش (two relaxation time model) استفاده شده است. محیط داخل کانال به عنوان یک محیط مشارکت کننده برای حل معادله انتقال تشعشع در نظر گرفته شد. در نهایت پس از فرمول بندی معادلات حاکم و شرایط مرزی برای مسئله حاضر در روش شبکه

بررسی پدیده‌های ترکیبی انتقال حرارت، تجزیه و تحلیل شار حرارتی و میدان دما یکی از موضوعات مهم در مهندسی است که کاربردهای زیادی در تجهیزات مختلف مانند مشعل، رادیاتور، دیگ‌های بخار، کلکتورهای خورشیدی، موتورهای احتراق داخلی و راکتورهای هسته ای دارد [۱-۵]. در چنین کاربردهایی، زمانی که دمای سیستم بالا باشد، مکانیسم‌های انتقال حرارت ترکیبی جابجایی و تشعشع مطرح می‌باشد و باید تعامل این مکانیسم‌ها مشخص گردد.

تشعشع تنها روش انتقال حرارت است که برخلاف انتقال حرارت هدایتی و جابجایی نیازی به محیط مادی ندارد و در محیط خلاء نیز امکان‌پذیر می‌باشد. انتقال حرارت تابشی همیشه اتفاق می‌افتد اما تأثیر آن در دماهای بالا قابل توجه است و در درجه حرارت‌های بالا پدیده غالب می‌باشد، به همین دلیل، تجزیه و تحلیل انتقال حرارت تابشی در دماهای بالا بسیار مهم می‌باشد.

با توجه به اهمیت موضوع، در بسیاری از پژوهش‌های انجام شده هر دو پدیده انتقال حرارت جابجایی و انتقال حرارت تابشی به صورت همزمان مورد بررسی قرار گرفته‌اند. اولین مطالعات در این زمینه در دهه ۸۰ میلادی توسط منگوک و ویسکانتا [۶] و یانگ [۷] انجام شده است. شرما و همکاران در سال ۲۰۰۷ [۸] به بررسی همزمان انتقال حرارت جابجایی و تشعشع در یک محفظه مربعی با نسبت‌های منطقی متفاوت پرداختند. در نهایت همبستگی بین عدد ناسلت متوسط برحسب عدد رایلی و نسبت‌های منطقی متوسط آنها ارائه شد که از آن می‌توان در مسائل طراحی استفاده کرد.

میکائیل مُدست و سندیپ در سال ۲۰۲۲ [۹] فرمول‌بندی‌های لازم برای کوپلینگ معادلات تابش در محیط‌های مشارکت‌کننده با انتقال حرارت هدایتی و جابجایی را توسعه دادند. در این پژوهش ابتدا کوپلینگ انتقال حرارت رسانایی-تابش، اثرات تغییرات فاز و سپس انتقال حرارت ترکیبی تابش و همرفت مورد بررسی قرار گرفته شد، که شامل بحث در مورد کوپلینگ تابشی با همرفت اجباری خارجی (لایه مرزی حرارتی)، همرفت اجباری داخلی (جریان پوازی) و همرفت طبیعی خارجی و داخلی است، همچنین در این پژوهش روش‌های عددی برای کوپلینگ حالت‌های مختلف انتقال حرارت در یک چارچوب کلی ارائه شده است. در این گزارش کوپلینگ صریح و نیمه‌ضمنی بین معادله انتقال حرارت تابشی و معادله انرژی به صورت کلی مورد بحث قرار گرفته است.

بولتزمن، اعتبارسنجی نتایج و حل همزمان معادلات، اثرات برخی پارامترها مانند ضخامت نوری، عدد پلانک و عدد ریچاردسون با تغییر زاویه کانال بر روی انتقال حرارت، جریان و توزیع دما مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج نشان داد که پارامترهای تابش تأثیر معنی داری بر مسئله دارند و می‌توانند سرعت و توزیع دمای کانال را تغییر دهند. در بین این پارامترها عدد پلانک بیشترین تأثیر را بر دما و سرعت جریان سیال دارد. افزایش زاویه کانال نسبت به افق باعث افزایش اثر نیروی شناوری، تغییرات سرعت سیال و مقادیر دمای سیال می‌شود.

بن نجما و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۱۴] به مدل‌سازی عددی انتقال حرارت و جرم همراه با تابش حرارتی و جابجایی اجباری در یک محیط نیمه شفاف در طی تبخیر یک لایه آب نازک مورد استفاده برای محافظت از دیوار در یک کانال پرداختند. در این پژوهش توجه ویژه‌ای به تجزیه و تحلیل تولید آنتروپی ناشی از انتقال حرارت و انتشار جرم شده است. معادلات حاکم به صورت عددی با استفاده از روش حجم محدود حل می‌شوند. علاوه بر این، تفکیک معادله انتقال تابشی با استفاده از روش «ردیابی پرتو» با توجه به یک طرح درجه دوم متقارن SN(S4) انجام شد، در حالی که خواص تابشی گاز غیر خاکستری با استفاده از مدل «SNB-Narrow Band Correlated-K» (CK) استنباط گردید. تأثیر چندین پارامتر بر تولید آنتروپی ناشی از هدایت، تابش حرارتی و انتشار جرم در این مقاله تحلیل شده‌اند. نتایج به وضوح تسلط عمده تولید آنتروپی تابشی دیواره را در تمام موارد مورد مطالعه نشان می‌دهد. نتایج همچنین ثابت می‌کنند که برای مقادیر بالای دمای دیوار خشک و گسیل‌پذیری، تولید آنتروپی ناشی از انتشار جرم افزایش می‌یابد.

اشکان جوادزادگان و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۱۵] به بررسی ترکیب همرفت اجباری و تابش در یک کانال با استفاده از روش شبکه بولتزمن (LBM) به صورت عددی پرداختند. اثرات خواص فیزیکی و ویژگی‌های تشعشعی مانند عدد پکلت، پارامتر تابش، ضریب انتشار و همچنین ضریب جذب بررسی شد. به منظور اعتبارسنجی روش عددی LBM، نتایج ابتدا با استفاده از روش حجم محدود (FVM) مقایسه گردید. مشاهده شد که در همه موارد، همزمانی مناسبی بین نتایج LBM و FVM وجود دارد. نتایج این مطالعه حاکی از آن است که با در نظر گرفتن انتقال حرارت تشعشعی، سهم زیادی در هندسه انتقال حرارت بررسی شده است و نرخ آن بسته به پارامترهای مختلف از جمله ϵ ، Pe ، Re و Pr تغییر می‌کند. افزایش پارامتر تابش

باعث افزایش دما و کاهش گرادیان دما می‌شود. با افزایش پارامتر تابش، رشد لایه مرزی حرارتی افزایش یافته و نفوذ آن به هسته مرکزی جریان به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. کاهش ضریب تابش دیواره‌ها باعث کاهش سرعت جذب تشعشع در کانال می‌شود. در اعداد Pe بالا، رشد و نفوذ لایه مرزی حرارتی به لایه های بالاتر از سطح گرم شده به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. دی‌پاک سن و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۱۶] یک مطالعه محاسباتی بر روی انتقال حرارت همرفتی مرکب با تابش سطحی در یک کانال مستطیلی با پخش‌کننده حرارت متصل به منبع حرارتی انجام دادند. سیال عامل هوا و جریان ثابت، تراکم ناپذیر و آرام در نظر گرفته شد. پارامترهایی مانند ضخامت بستر و پخش‌کننده حرارت، منبع گرما و عرض کانال و فاصله بین منابع گرما ثابت فرض شدند. معادلات حاکم با استفاده از نرم‌افزار ANSYS 16.2 با الگوریتم SIMPLE حل شدند. تأثیر عدد رینولدز ($Re=100, 250, 500, 750$)، گسیل منبع حرارت ($\epsilon_{sp}=0.1$ to 0.9)، پخش‌کننده حرارت ($\epsilon_c=0.1$ to 0.9) و ضخامت دیواره کانال ($\epsilon_s=0.1$ to 0.9) بر روی نرخ انتقال حرارت مورد مطالعه قرار گرفته شد. مشخص گردید که حداکثر دمای غیربعدي (θ_m) در مقادیر مرجع نسبت به حالت بدون پخش‌کننده به دلیل قرار دادن پخش‌کننده حرارتی، ۱۱٫۵۳٪ کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که گسیل منبع گرما در مقایسه با انتشار حرارت پخش‌کننده و دیواره کانال ناچیز است. ام. پراکاش و همکاران در سال ۲۰۲۲ [۱۷] به بررسی تجربی و عددی انتقال گرمای جابجایی ترکیبی آرام و تشعشع سطحی در محفظه پر از هوا، تحت یک شار حرارتی ثابت که به سمت دریاچه حفره القاء می‌شود، پرداختند. نتایج تجربی برای ورودی گرما، $Q=3.19W-16.71W$ ، عدد رینولدز، $Re=4814-166385$ ، و عدد ریچاردسون، $Ri=0.1-25$ ارائه گردید. در این مطالعه، شبیه‌سازی عددی در حفره هواکش دوبعدی برای غنی‌سازی کار تجربی برای نسبت ابعاد، $A=1-5$ ، و گسیل سطح، $\epsilon=0.05-0.85$ نیز انجام گردید. معادلات تکانه و انرژی تحت تقریب‌های بوزینسک با استفاده از روش شناخته شده حجم محدود حل شدند و کد عددی در نرم‌افزار فرترن برای بدست آوردن تمام نتایج عددی نوشته شد. براساس داده‌های تجربی موجود، همبستگی‌هایی برای عدد ناسلت و حداکثر دمای سطح گرم شده ایجاد گردید.

آکینشیلو در سال ۲۰۱۹ [۱۸] جریان سیال مغناطیسی هیدرودینامیکی جابجایی ترکیبی (MHD) از طریق کانال

¹ Magneto hydro dynamic

ناپایدار با استفاده از تکنیک تفاضل محدود حل گردید، همچنین مدل ترکیبی توسعه یافته در مقایسه با داده‌های عددی تجربی و به‌روز تأیید شد. مدل‌سازی ریاضی برای فرمول‌های مسئله دو بعدی و سه‌بعدی تحت تغییر عدد رایلی، عدد رانسن-تابش و گسیل سطح انجام شد. مشخص شد که اختلاف بین نتایج دو بعدی و سه بعدی با افزایش نرخ انتقال حرارت تشعشع افزایش یافته است. عملکرد محاسباتی روش بولتزمن شبکه هیبریدی چندین برابر روش تحلیلی معمولی بود.

میخائیل شریتم و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۲۱] همرفت گرمایی و تابش سطحی در یک محفظه دوار با عنصر تولید حرارتی حجمی متغیر مورد مطالعه قرار دادند. محفظه بررسی شده دارای دو مرز افقی عایق حرارتی، دو دیواره عمودی همدمای با دمای پایین و عنصر تولید حرارت متغیر در مرز پایینی است. حفره با سرعت زاویه ای ثابت می چرخد. مدل ریاضی در تابع جریان بی‌بعدی و توابع گردابی فرموله شده است. معادلات مهم با تکنیک تفاضل محدود بر روی شبکه یکنواخت به دست آمده است. اثرات عدد تیلور، گسیل سطح، و فرکانس نوسان تولید گرمای حجمی منبع حرارت بر انتقال گرما و جرم مورد بررسی قرار گرفته است. مشخص شده است که گسیل سطح و فرکانس نوسان تولید گرما حجمی می تواند انتقال حرارت را در یک حفره چرخان بهبود بخشد. افزایش تابش سطحی، افزایش انتقال انرژی کل و کاهش دمای متوسط هیتر را نشان می دهد، در حالی که افزایش فرکانس نوسان تولید گرما حجمی، کاهش میانگین دمای هیتر را مشخص می کند.

محمد فروزان‌نیا و همکاران در سال ۲۰۲۰ [۲۲] به طور عددی برداشت حرارت تولید شده در برخی از دستگاه‌های الکترونیکی را برای جلوگیری از سرد شدن بیش از حد و حفظ یکنواختی دمای محیط با هدف افزایش طول عمر دستگاه بررسی کرده‌اند. برای این منظور، انتقال انرژی همرفتی-تابشی ترکیبی مزدوج به صورت مربع و محفظه کج حاوی یک بلوک جامد پوخته مربعی توخالی به عنوان حفره دوم با تولید گرمای یکنواخت که در ناحیه مرکزی محفظه قرار می‌گیرد، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. برای حل معادلات حاکم از روش تفاضل محدود استفاده شده است. همچنین برای در نظر گرفتن اثر تابش گاز، محاسبات تشعشعی بر اساس حل عددی معادله انتقال تشعشع و با روش جهات مجزا (DO) حل شده است. اثرات عدد پلانک، زاویه شیب حفره، ضخامت نوری گاز و انتشار سطح مرزها بر جریان و ویژگی‌های حرارتی سیستم و کنترل دمای کاری نزدیک به نقطه تنظیم بهینه مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از گاز پرکننده تابشی با ضخامت نوری کم،

متخلخل عمودی با اثر تابش در نظر گرفته شده را بررسی کرد. سیال MHD جابجایی ترکیبی از طریق میکرو کانال عمودی با دیواره‌های رسانا و نارسای الکتریکی توسط معادلات تکانه و انرژی فرموله می‌شوند. اثرات پارامترهای رئولوژیکی کلیدی مانند عدد پرانتل مغناطیسی، گرادیان فشار، عدد رینولدز و پارامتر تابش بر روی انتقال گرما و جرم بررسی می‌شوند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش ترم فشار منجر به افزایش توزیع سرعت می‌گردد که تأثیر آن به سمت مرکز کانال جریان حداکثر است در حالی که افزایش پارامتر تابش کاهش توزیع دما را نشان می‌دهد اما تأثیر آن نسبت به دیوار رسانای الکتریکی قابل توجه است. مقایسه نتایج به‌دست آمده با حل عددی رانگ کوتا مرتبه چهارم مطابقت رضایت‌بخشی را نشان می‌دهد.

حسن حمدی و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۱۹] انتقال حرارت تابشی-همرفتی یک منبع حرارتی گسسته (تراشه) در داخل یک محفظه خنک‌شده توسط چاه حرارتی مستطیلی پره‌ای را به صورت سه بعدی مورد مطالعه قرار دادند. انتقال حرارت از طریق دیواره‌های محفظه و تبادل تابش بین این دیواره‌ها و همچنین انتقال حرارت همرفتی روی سطوح بیرونی محفظه به محیط در نظر گرفته شده است. یک مدل ریاضی سه بعدی کامل از سیستم فیزیکی با استفاده از روش تفاضل محدود به صورت عددی ارائه و در نرم افزار متلب برنامه ریزی شده و با استفاده از یک کار تجربی اعتبار سنجی انجام شده است. نتایج نشان دهنده تطابق خوبی بین نتایج عددی و تجربی در صورت در نظر گرفتن تابش است. تأثیر نسبت ابعاد محفظه و قدرت تراشه بر خنک‌سازی و انتقال حرارت و جریان سیال در داخل محفظه بررسی گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که در یک دستگاه الکترونیکی محصور، تأثیر تابش در تحلیل حرارتی وابسته به زمان که خنک‌کنندگی دستگاه به صورت همرفت طبیعی می‌باشد، مهم است. زمانی که شار حرارتی تراشه ۵ کیلووات بر متر مربع باشد، نادیده گرفتن تأثیر تشعشع، دمای تراشه را حدود ۲۰٪ افزایش می‌دهد. افزایش شار حرارتی تراشه و نسبت ابعاد، گردابه‌های جریان هوا را در داخل محفظه کاهش می‌دهد. در شار حرارتی تراشه ۱/۲۵ و ۵ کیلووات بر متر مربع، عدد ناسلت تشعشعی به ترتیب حدود ۱۷/۸ و ۱۹/۷ درصد از عدد ناسلت کل را نشان می‌دهد.

الکساندر نیی در سال ۲۰۲۰ [۲۰] یک مدل ترکیبی برای جابجایی طبیعی سه بعدی همراه با تابش حرارتی سطحی در یک مکعب بسته با حرارت متفاوت توسعه داده است. در این مدل، روش عددی برای جریان سیال بر حسب روش بولتزمن شبکه تحت تقریب Bhatnagar-Gross-Krook با طرح D3Q19 در نظر گرفته شد. از طرفی معادله انرژی سه بعدی

تولید حرارت از طریق شکافت هسته‌ای در بخش قرص سوخت اورانیوم و انتقال انرژی از طریق لایه هلیوم و غلاف به سیال خنک کننده در قلب راکتور می‌باشند، همچنین به عنوان اولین سپر برای محافظت ماده رادیواکتیو تولید شده در اثر شکافت هسته‌ای از سوخت اورانیوم برای جلوگیری از نشت مواد رادیواکتیو به محیط عمل می‌کنند. بنابراین در نیروگاه‌های هسته‌ای هر حادثه‌ای رخ بدهد تا زمانی که میله‌های سوخت ذوب نشوند آن حادثه قابل کنترل می‌باشد. تری مایل آیلند، چرنوبیل و فوکوشیما حوادث معروفی هستند که در آنها سناریوهای حادثه ذوب قلب راکتور اتفاق افتاد [۳۲-۳۵]. در اینگونه حوادث، ذوب شدن میله‌های سوخت، باعث نشت ماده رادیواکتیو در سیال خنک کننده می‌شود. همچنین ممکن است در اثر واکنش زیرکونیوم و آب انفجار هیدروژنی رخ بدهد. دلیل ذوب میله سوخت این است که حرارت تولید شده توسط قرص‌های سوخت به اندازه کافی توسط سیستم‌های خنک‌کننده راکتور برداشت نمی‌شوند در نتیجه دمای میله سوخت افزایش می‌یابد و از نقطه ذوب آن فراتر می‌رود و حادثه ذوب اتفاق می‌افتد [۳۶-۳۹]. در کل بررسی انتقال حرارت در میله‌های سوخت هسته‌ای و همچنین بررسی جریان سیال خنک‌کننده از موضوعات مهم در طراحی نیروگاه‌های هسته‌ای می‌باشد.

در این زمینه نیز پژوهش‌های مختلفی انجام شده است، از جمله صفایی و همکاران در سال ۲۰۱۰ [۴۰] آنالیز ترموهیدرولیکی مجتمع سوخت داغ قلب راکتور بوشهر را در حالت پایا با کد COBRA-EN بررسی کرده‌اند، و ماکزیم و متوسط دمای سوخت، دمای سطح داخلی و خارجی غلاف و تغییرات دما، فشار و چگالی در کانال داغ را محاسبه کردند. صادقی آزاد و چوبدار در سال ۲۰۲۱ [۴۱] آنالیز ترموهیدرولیکی مجتمع سوخت داغ راکتور نیروگاه بوشهر را به صورت زیرکانال در حالت گذرا زمانی که یکی از پمپ‌های مدار اول از کار می‌افتد بررسی کرده‌اند و تغییرات دمای میله سوخت داغ برحسب زمان گزارش کرده‌اند.

رامیرو فریلی و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۴۲] سیستم خنک‌کننده کوییتی راکتور (RCCS) را که یک سیستم ایمنی رایج در راکتورهای خنک‌کننده گازی با دمای بالا (HTGR) است مورد مطالعه قرار دادند این سیستم گرما را از مخزن تحت فشار راکتور (RPV) توسط انتقال حرارت تشعشع (۸۰٪) و همرفت طبیعی (۲۰٪) حذف می‌کند. برای شبیه‌سازی سناریوهای حادثه HTGR، باید از مدل‌های صحت‌سنجی

عدد پلانک بالا و اعمال تابش سطحی بالاتر، می‌توان نرخ خنک‌سازی بیشتری را در دوره گذرا به ترتیب تا ۳۸٪، ۸۵٪ و ۵۰٪ بدست آورد.

هان و بانگ در سال ۲۰۱۱ [۲۳] با استفاده از روش حجم محدود معادله تشعشع را گسسته‌سازی و حل کردند. امین دهگشایی و داوود گنجی در سال ۲۰۱۸ [۲۴] هم انتقال حرارت ترکیبی جابجایی و تشعشع رو به صورت عددی در محفظه افقی بسته بررسی کرده‌اند. احمدرضا رحمتی و همکارانش در سال ۲۰۱۶ [۲۵] شبیه‌سازی عددی انتقال حرارت جابجایی طبیعی به همراه تشعشع در محفظه مربعی مانع دار مورد بررسی قرار داده‌اند، در این شبیه‌سازی دیواره عمودی محفظه سرد با دمای ثابت ولی دیواره‌های افقی عایق بندی شده در نظر گرفته شده‌اند و اثر تغییر عدد رایلی و اندازه و مکان استوانه گرم و ضریب صدور آن مورد بحث قرار گرفته شده است. قارن درستی و مهدی معرفت در سال ۲۰۰۹ [۲۶] اثر انتقال حرارت تشعشعی و جابجایی آزاد بر انتقال حرارت و رفتار جریان در محفظه‌های عمودی باریک پره‌دار به کمک تحلیل عددی مورد بررسی قرار دادند، در این پژوهش انتقال حرارت تشعشعی بین سطوح و ضریب دیده‌ها به کمک تقریب اجزای مرزی و روش مونت کارلو محاسبه گردیدند و میدانهای جریان و انتقال حرارت به کمک الگوریتم سیمپل حل شده و سهم هر یک از حالت‌های انتقال حرارت مشخص شدند، نتایج نشان دادند که با توجه به مقدار عدد تشعشع، انتقال حرارت تشعشع ۸ تا ۸۴ درصد سهم انتقال حرارت کلی را به خود اختصاص می‌دهد. تا کنون روش‌های عددی بسیاری برای حل معادله تشعشع پیشنهاد شده است. چوی و ریت بی در سال ۲۰۱۱ [۲۷] و چای و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۲۸] روش حجم محدود را برای حل این مسائل پیشنهاد داده‌اند. در خصوص جابجایی طبیعی بین سیلندرهای هم‌مرکز و غیر هم‌مرکز، کوئن و گلدشتاین در سال‌های ۲۰۱۰ و ۲۰۰۹ [۲۹ و ۳۰] مطالعات تئوری و تجربی گسترده‌ای را انجام دادند. چو و همکاران در سال ۲۰۱۱ [۳۱] نیز این موضوع را به روش عددی بررسی کردند.

همچنین یکی از زمینه‌هایی که بحث انتقال حرارت در آنها مطرح می‌باشد قلب راکتورهای هسته‌ای می‌باشد، از زمان ساخت و بهره برداری اولین نسل‌های راکتورهای هسته‌ای تا کنون موضوع نحوه انتقال حرارت و برداشت حرارت از میله‌های سوخت‌های موجود در قلب این راکتورها مورد توجه محققین بوده‌است. میله‌های سوخت نیروگاه‌های هسته‌ای علاوه بر اینکه هم منبع

انتقال حرارت محلی محاسبه شده عددی، عدد ناسلت کلی، و افت فشار در سراسر میله آزمایش تطابق خوبی با نتایج تجربی مربوطه نشان می‌دهد. برای سطح ناهموار شبیه‌سازی شده، ضریب انتقال حرارت در مقایسه با سطح صاف به میزان ۸۶ درصد افزایش یافت.

با انجام عملیات پیشگیرانه و شبیه‌سازی و مدل‌سازی‌ها دقیق انتقال حرارت می‌توان این حوادث را بررسی و تحلیل کرد و شدت خسارات ناشی از آنها را کاهش داد. بنابراین، در این پژوهش، بررسی و شبیه‌سازی فرایند انتقال حرارت جابجایی توأم با تشعشع در میله سوخت هسته‌ای راکتور PWR مانند راکتور بوشهر بررسی می‌شود.

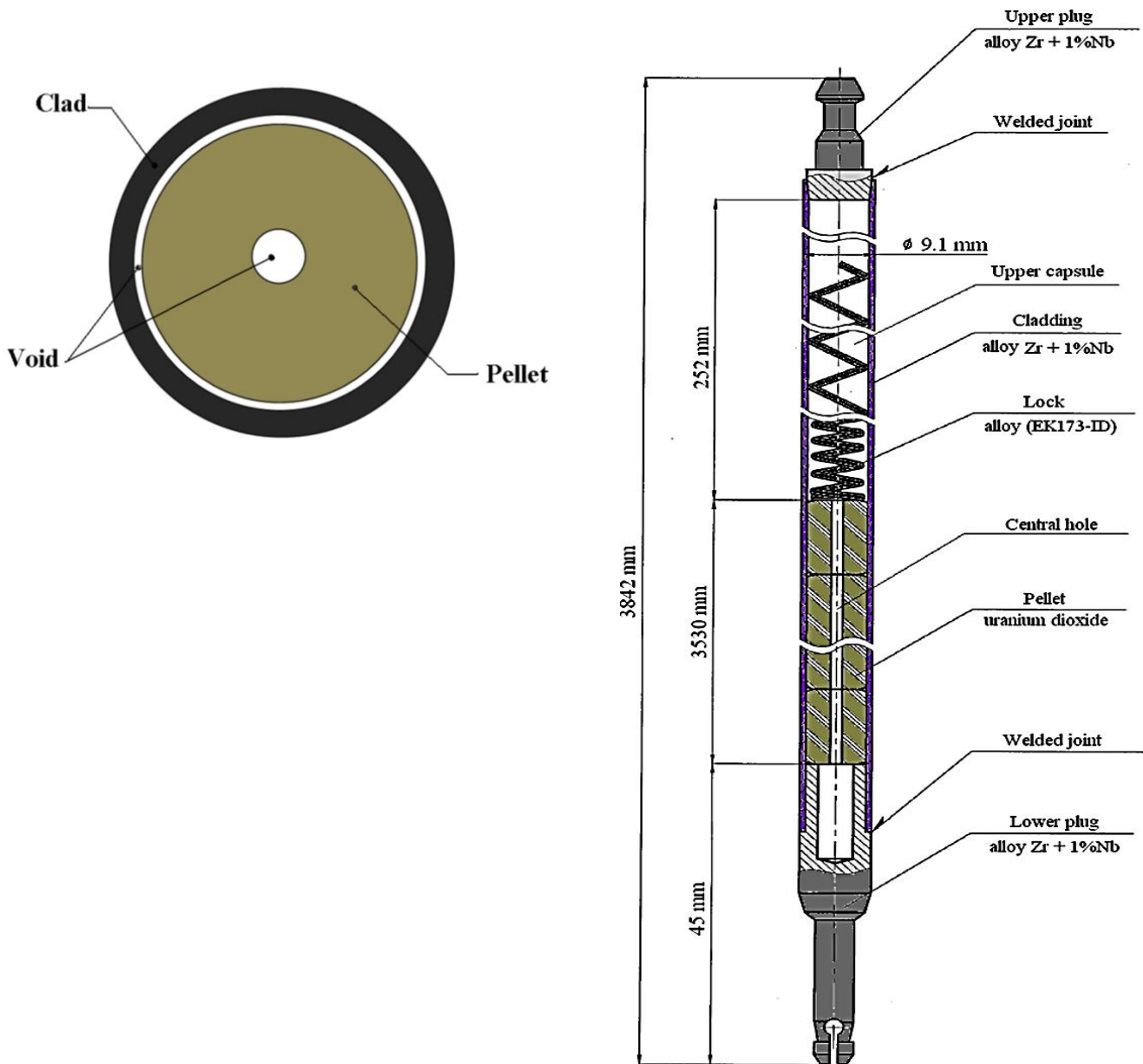
۲- ساختار میله سوخت راکتور هسته‌ای

میله‌های سوخت راکتورهای هسته‌ای آب سبک تشکیل شده‌اند از غلافی استوانه‌ای از جنس زیرکالوی و یا آلیاژ زیرکونیوم-نیوبیوم که در داخل آن سوخت هسته‌ای دی اکسید اورانیوم به شکل قرص‌های سینتر شده جا داده شده است. سوخت دی اکسید اورانیوم ترکیبی از ایزوتوپ شکافت پذیر اورانیوم-۲۳۵ و ایزوتوپ بارور اورانیوم-۲۳۸ می‌باشد. در میله‌های سوخت، سوخت و غلاف در تماس با یکدیگر نمی‌باشند بلکه بین آنها فضایی منظور شده است که در ابتدا از هلیوم با فشار ۲۰ الی ۳۰ اتمسفر (در دمای محیط) پر شده است. علت استفاده از گاز هلیوم، بهتر بودن هدایت حرارتی آن در مقایسه با سایر گازهای بی اثر می‌باشد. وجود گاز با فشار زیاد در شکاف بین سوخت و غلاف باعث شده است که فضای مناسب برای انبساط سوخت فراهم شود و نیز در شروع کار راکتور از وارد شدن تنش مکانیکی زیاد به غلاف ممانعت شود زیرا با تحت فشار قرار گرفتن میله سوخت، اختلاف فشار داخل میله سوخت و خنک کننده که عامل بوجود آمدن کرنش الاستیک در غلاف می‌باشد، کاهش می‌یابد. در شکل ۱- (الف) و (ب) به ترتیب میله سوخت و مقطع میله سوخت راکتور هسته‌ای بوشهر نشان داده شده‌اند، که شامل قرص سوخت UO_2 و غلاف از جنس زیرکالوی (Zr+1%Nb) است. معمولاً چگالی قرص‌های سوخت در حدود $10/4$ تا $10/7$ گرم بر سانتی‌متر مکعب می‌باشد. اطلاعات کامل مربوط به میله‌های سوخت این راکتور در جدول (۱) آمده است [۴۵].

متوسط و کدهای سیستم برای محدود کردن زمان اجرای مدل‌ها استفاده شود. در حالی که یک کمی‌سازی دقیق از انتقال حرارت تشعشعی در این مدل‌ها وجود دارد، ولی کمی‌سازی همرفت طبیعی باید براساس همبستگی‌هایی با دقت سوال‌برانگیز برای عدد ناسلت تکیه داشته باشند. همبستگی‌های رایج بر اساس آزمایش‌هایی هستند که در اعداد ریلی کم و یا با استفاده از دیواره‌های هم‌دما در هندسه‌های ساده‌شده انجام می‌شوند. این کار بر روی دقت همبستگی‌های انتقال حرارت جابجایی طبیعی برای پشتیبانی از طرح‌های HTGR بهبود می‌بخشد. این همبستگی‌ها شامل اعداد ناسلت محلی و متوسط به عنوان تابعی از عدد ریلی کلی، عدد ریلی محلی، و مشخصات دما در دیواره داغ RCCS است.

پاتریک زدلر و همکاران در سال ۲۰۲۱ [۴۳] شرایط ترموهیدرولیک در یک موکاپ مجتمع سوخت هسته‌ای را با در نظر گرفتن تأثیر جریان هوای افقی بالای مجتمع میله‌های سوخت مورد مطالعه قرار دادند. بررسی‌ها در مرکز آزمایشگاه ALADIN انجام شد، که یک مجتمع سوخت راکتور آب جوشان را در مقیاس ۱:۱ به صورت محوری و شعاعی مدل‌سازی کردند. در سناریوی مورد مطالعه، مکانیسم‌های اصلی انتقال حرارت رسانش، همرفت و تابش باهم کوپل شدند. بررسی مدل به صورت تجربی و شبیه‌سازی تحلیلی (CFD) برای تجزیه و تحلیل فرآیندهای انتقال حرارت نتایج مطلوبی ارائه دادند. در این پژوهش، تمامی مکانیسم‌های انتقال حرارت در شبیه‌سازی با مدل‌های پیچیده در نظر گرفته شدند. نتایج عددی با توجه به تفاوت‌های اجتناب‌ناپذیر بین رویکردها، مطابقت خوبی با اندازه‌گیری‌ها انجام شده داشتند.

امی‌تاو تیکادار و همکاران در سال ۲۰۱۸ [۴۴] مطالعات عددی بر روی انتقال حرارت و افت فشار در یک میله سوخت هسته‌ای شبیه‌سازی شده با زبری سطح سه‌بعدی انجام دادند. شبیه‌سازی‌های عددی دو بعدی با استفاده از مدل آشفته SST برای ارزیابی انتقال حرارت و افت فشار بر روی بخش صاف و ناهموار میله داغ انجام شد. نتایج عددی با داده‌های تجربی به‌دست‌آمده از یک المنت حرارتی که به عنوان یک میله سوخت اینکونل-نیکل را برای راکتور آب تحت فشار (PWR) شبیه‌سازی شده بود، مقایسه شد. طول میله $2152/6$ میلی‌متر و قطر بیرونی آن $9/5$ میلی‌متر بود که سطح بیرونی یک بخش به طول $304/8$ میلی‌متر از میله سوخت اینکونل با زبری سطح سه بعدی (بلوک‌های الماسی شکل) اصلاح شد. زاویه موج برای هر بلوک الماس ۴۵ درجه و طول هر طرف بلوک الماس ۱ میلی‌متر بود. ضریب



شکل ۱ (الف) میله سوخت هسته‌ای و (ب) مقطع میله سوخت راکتور هسته‌ای

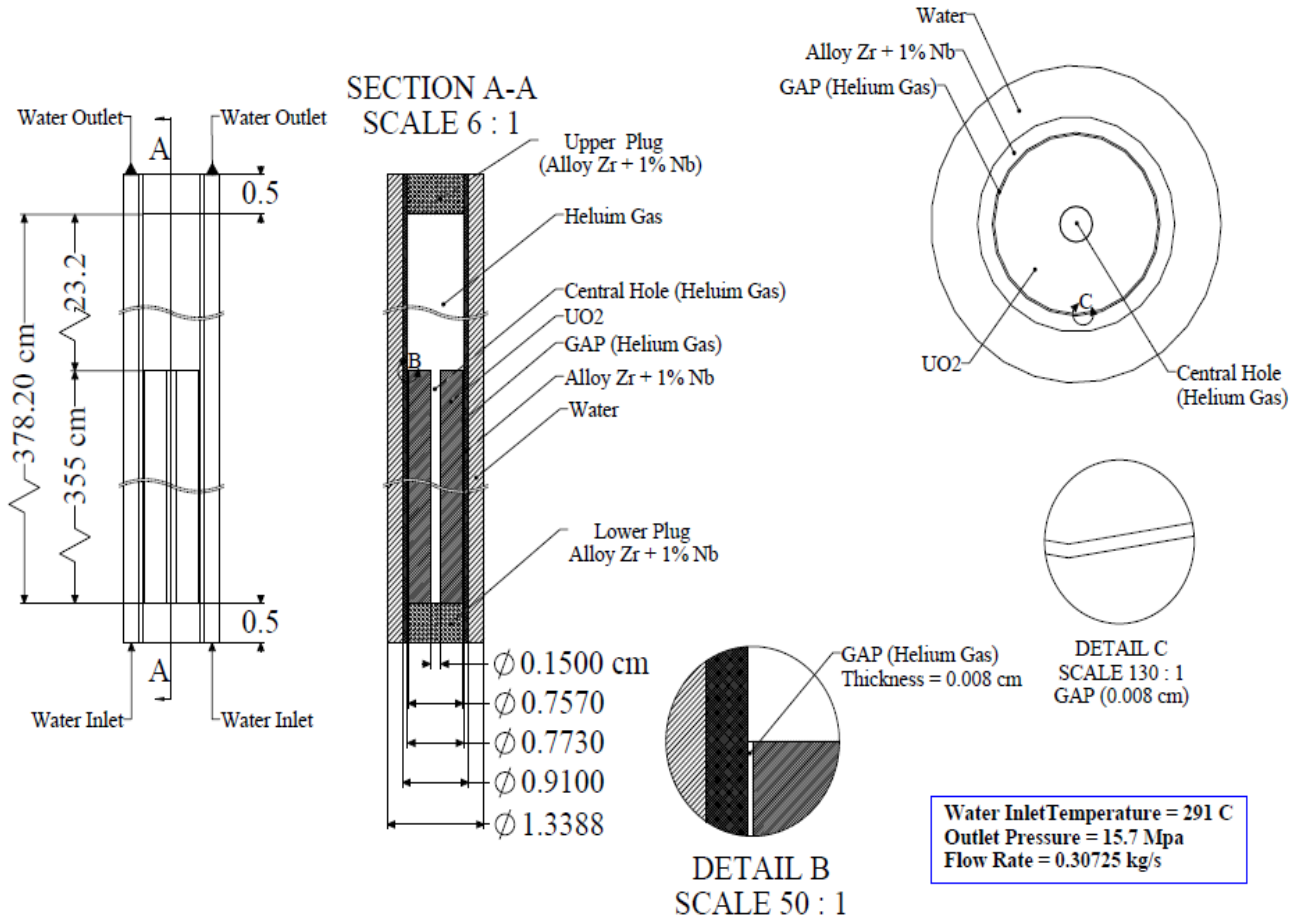
جدول ۱ مشخصات میله سوخت [۴۵]

میله سوخت	
۱/۵۷۵	جرم اکسید اورانیوم موجود در هر میله سوخت، kg
Alloy Zr + 1% Nb	جنس غلاف
۹/۱	قطر خارجی غلاف، mm
۷/۷۳	قطر داخلی غلاف، mm
UO ₂	جنس قرص سوخت
۷/۵۷	قطر خارجی قرص سوخت، mm
۱/۵	قطر حفره مرکزی قرص سوخت، mm
۱۱	ارتفاع قرص سوخت، mm
۱۰/۷ - ۱۰/۴	چگالی قرص سوخت، g/cm ³

خنک کننده در قلب راکتور صورت می گیرد، مدل سازی این بخش از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در شکل (۲) هندسه میله سوخت به صورت تک کانال که شبیه سازی بر اساس آن انجام می گیرد، نشان داده شده است.

۳- هندسه و مدل سازی میله سوخت راکتور

با توجه به این که فرایند شکافت هسته ای و تولید مقدار قابل توجهی از انرژی گرمایی و همچنین برداشت آن توسط سیال



شکل ۲ هندسه میله سوختی شبیه سازی شده

۴- معادلات حاکم

برای مدلسازی جریان گاز هلیوم در فضای پلنوم بالای سوخت و همچنین در گپ بین سوخت و غلاف از مدل تقارن محوری استفاده شده است. با توجه به اینکه گاز هلیوم موجود در داخل میله سوخت با محیط پیرامون خود هیچگونه تبادل گرمی ندارد، بنابراین شرایط اولیه حاکم بر مساله از اهمیت ویژه ای برخوردار خواهد بود. به عبارت دیگر به عنوان مثال با تغییر فشار گاز هلیوم داخل محفظه که به عنوان یکی از پارامترهای مورد بررسی در کار حاضر می باشد، جرم گاز محصور در داخل گپ میله سوخت نیز تغییر خواهد کرد. بنابراین برای حل مساله از

میله سوخت در داخل خنک کننده آب، با فشار و دمای مشخص، قرار دارد و فرض می شود که فشار خنک کننده و دمای سطح خارجی غلاف در شرایط بهره برداری پایا و عادی راکتور ثابت می باشد (مقادیر ثابت طراحی). یکی از معیارهای مهم در تحلیل حادثه LOCA، دمای نقطه داغ می باشد که به دلیل از دست رفتن سیال خنک کننده ممکن است از مقدار تعیین شده در بازه طراحی تجاوز کند. لذا در محاسبات توزیع توان برای نقطه داغ از میان حالت های مختلف توزیع توان در میله های سوخت، حالتی را برگزیدیم که مقدار ضریب توزیع توان در میله داغ نسبت به سایر حالت ها بزرگ تر باشد (۳۳/۶۷ kw/m) تا شرایط بدبینانه تری برای تحلیل حادثه در نظر گرفته شود.

¹ Loss of Coolant Accident

می‌باشد از اثرات جذب و پراکنش برای تابش عبوری از آن صرف نظر شده است؛ به عبارت دیگر محیط غیرمشارکتی در نظر گرفته شده است. همچنین معادله انرژی استفاده شده به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\rho c_p (u_r \frac{\partial T}{\partial r} + u_\theta \frac{\partial T}{\partial \theta} + u_z \frac{\partial T}{\partial z}) = K \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] + S_{radiation} \quad (4)$$

در مسائل انتقال حرارت جابجایی عدد گراشف کنترل کننده رژیم جریان می‌باشد، که نشان دهنده نسبت نیروی شناوری به نیروی برش ویسکوز بوده و به صورت رابطه زیر تعریف می‌گردد.

$$Gr_L = \frac{g \beta (T_1 - T_2) L_c^3}{\nu^2} \quad (5)$$

در رابطه بالا g معرف شتاب گرانش، β نشان دهنده ضریب انبساط حجمی، L_c بیانگر طول مشخصه در هندسه مورد بررسی، ν ویسکوزیته دینامیکی، و T_1 و T_2 نیز به ترتیب بیانگر دمای صفحات گرم و سرد می‌باشند. همچنین برای ضریب انتقال حرارت جابجایی بین گاز موجود در محفظه و سطح داخلی غلاف می‌توان از رابطه Chu و $Churchill$ برای صفحه تخت عمودی در جریان آرام و مغشوش استفاده نمود [۲۹]. با در نظر گرفتن ارتفاع محفظه به عنوان طول مشخصه، عدد رایلی از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.37 Ra^{1/6}}{\left[1 + (0.492 / Pr)^{9/16} \right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (6)$$

یکی دیگر از پارامترهای مهم در مسائل انتقال حرارت تابشی، ضریب گسیل تابش برای مواد مورد استفاده در هندسه می‌باشد که در کار حاضر این ضریب برای سوخت، غلاف و آب از داده‌های موجود در مرجع [۳۰] استخراج شده است. روابط استخراج شده برای این ضریب برای غلاف ۰/۱۸۴ و برای آب ۰/۹۶ است و برای سوخت دی اکسید اورانیوم از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$\varepsilon_f = 0.78 + 1.53 \times 10^{-5} T \quad (7)$$

فرم ناپایای معادلات ناویر استوکس استفاده شده است، فرم دیفرانسیلی معادله پیوستگی برای سیال تراکم پذیر ناپایا در رابطه (۱) آورده شده است.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

فرم دیفرانسیلی معادلات مومنوم برای سیال تراکم پذیر ناپایا نیز در رابطه (۲) آورده شده است:

$$\frac{\partial (\rho \vec{V})}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla (\rho \vec{V}) = \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \lambda \nabla (\nabla \cdot \vec{V}) \quad (2)$$

در روابط بالا \vec{V} بردار سرعت در راستای (r, θ, z) ، p معرف فشار، ρ بیانگر چگالی، μ نشان دهنده ویسکوزیته دینامیکی و λ نشان دهنده ضریب ویسکوزیته ثانویه می‌باشد که در کار حاضر با فرض استوکس برابر با $-2\mu/3$ در نظر گرفته شده است.

در پژوهش حاضر با توجه به گرادیان‌های دمایی بالایی که مورد بررسی قرار می‌گیرد، برای همبستگی بین فشار، دما و چگالی هلیوم محصور بین سوخت و غلاف از فرض گاز ایده آل استفاده شده است. به منظور مدلسازی انتقال حرارت تابشی از مدل محورهای مجزا (DO) استفاده شد. در این روش معادله انتقال تابش برای تعداد محدودی از زوایای فضایی که متناظر با بردار جهت \vec{S} می‌باشد، حل می‌گردد. معادله انتقال تابش در این روش برای نقطه‌ای با موقعیت \vec{r} در راستای \vec{S} به صورت رابطه (۳) بیان می‌گردد:

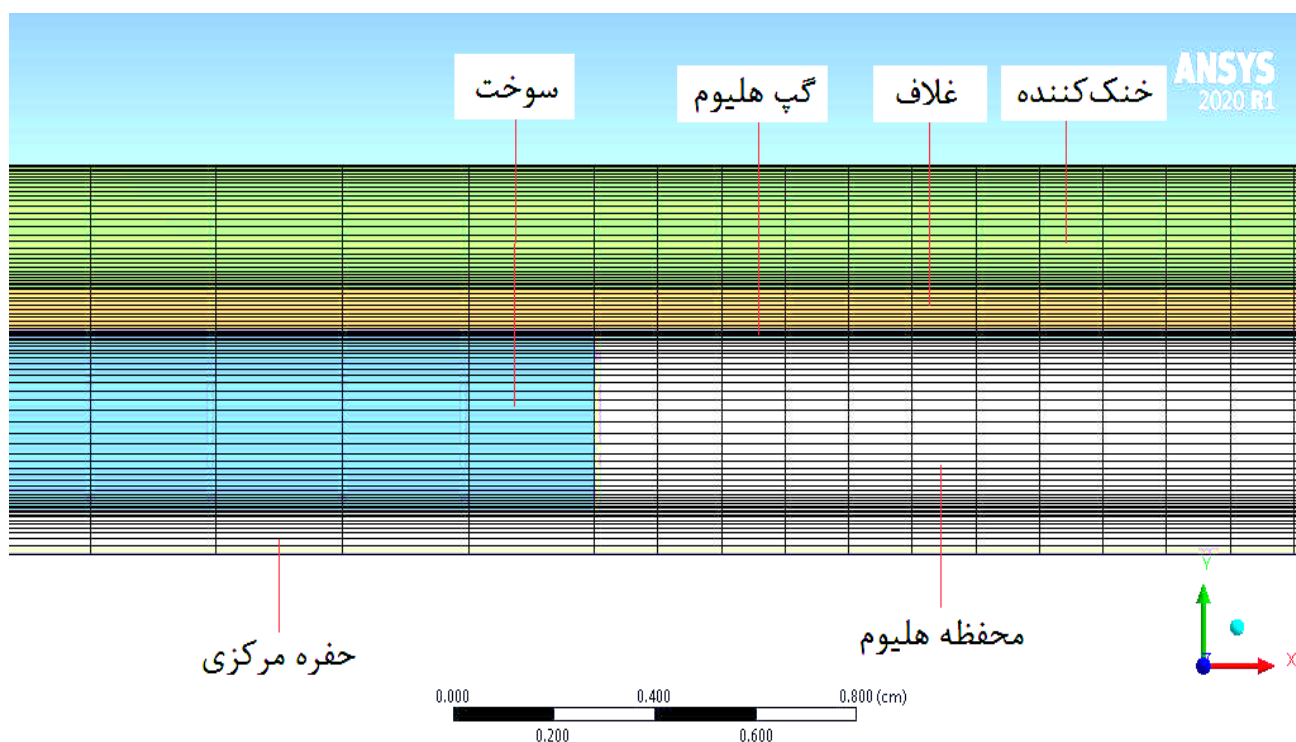
$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{ds} + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = \frac{an^2 \sigma T^4}{4\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (3)$$

که در رابطه (۳) I شدت تابش، \vec{S} بردار جهت، \vec{S}' بردار جهت برای پراکنش، a ضریب جذب، σ_s ضریب پراکنش، Φ تابع فاز پراکنش، Ω' زاویه فضایی بوده و n معرف اندیس انکسار در محیط مورد بررسی می‌باشد. به طور معمول سیالاتی مانند هوا و گازهای خنثی از جمله گاز هلیوم نقش مشارکتی در انتقال حرارت تابش ایفا نمی‌کنند. بنابراین در کار حاضر با توجه به اینکه سیال مورد استفاده مابین سوخت و غلاف هلیوم

۵- مدل سازی با نرم افزار ANSYS FLUENT

زوایای گسسته شده حل می‌کند. هریک از این زوایای گسسته شده با یک بردار جهت S مشخص شده در سیستم مختصات کارتزین، متناظر است. اندازه زوایای گسسته شده در این مدل سازی ۴ در نظر گرفته شده است. مدل DO تمام ضخامت‌های اپتیکی را پوشش می‌دهد. مدل DO استفاده شده در نرم افزار FLUENT تنها برای تابش خاکستری و تابش غیرخاکستری (با استفاده از مدل باند خاکستری) کاربرد دارد. در شکل (۳) میله سوخت شبیه سازی شده با نرم افزار انسیس فلونت با نشان دادن بخش‌های مختلف میله سوخت و شبکه بندی مورد نظر (بعد از بررسی استقلال از مش تعداد نودها ۱۳۸۰۳۰) نشان داده شده است.

روش حل در این مدل همانند روش حل معادلات مومنتم و انرژی حاکم بر سیال است. این مدل بصورت مجزا و کوپل شده با معادلات حاکم بر جریان حل می‌شود. در این مدل سازی فرض بر این است که سطوح، خاکستری و منتشر کننده هستند. ضریب انتشار و جذب نیز مستقل از طول موج بوده و همچنین طبق قانون کیرشهف (Kirchoff's Law) با هم برابر می‌باشند. معادلات حاکم بر اساس روش حجم محدود و الگوریتم Coupled گسسته سازی شده اند و به صورت ضمنی حل می‌گردند. مدل تشعشع DO معادله انتقال تابشی (Radiative Transfer Equation (RTE را برای تعداد محدودی از



شکل ۳ شبکه مش بندی میله سوختی شبیه سازی شده

عدد رینولدز محاسبه شده حاکی از وجود جریان آشفته در داخل کانال خنک کننده می‌باشد. در این مدل سازی برای جریان آشفته از مدل $SST K-\omega$ استفاده گردیده است. مدل آشفتگی $SST K-\omega$ یک مدل دو معادله ای لزجت گردابی است که بسیار متداول و معمول می‌باشد. کاربرد روابط کا-امگا در بخش درونی لایه مرزی سبب می‌شود که این مدل در تمام ناحیه زیر لایه لزج نزدیک دیواره عملکرد بسیار مناسبی داشته باشد و بنابراین مدل $SST K-\omega$ می‌تواند به عنوان یک مدل آشفتگی بدون هیچ گونه تابع میرایی اضافی مورد استفاده قرار گیرد. مدل

برای بررسی نوع جریان سیال خنک کننده در داخل کانال باید عدد رینولدز محاسبه و بررسی گردد، برای محاسبه عدد رینولدز از رابطه زیر داریم:

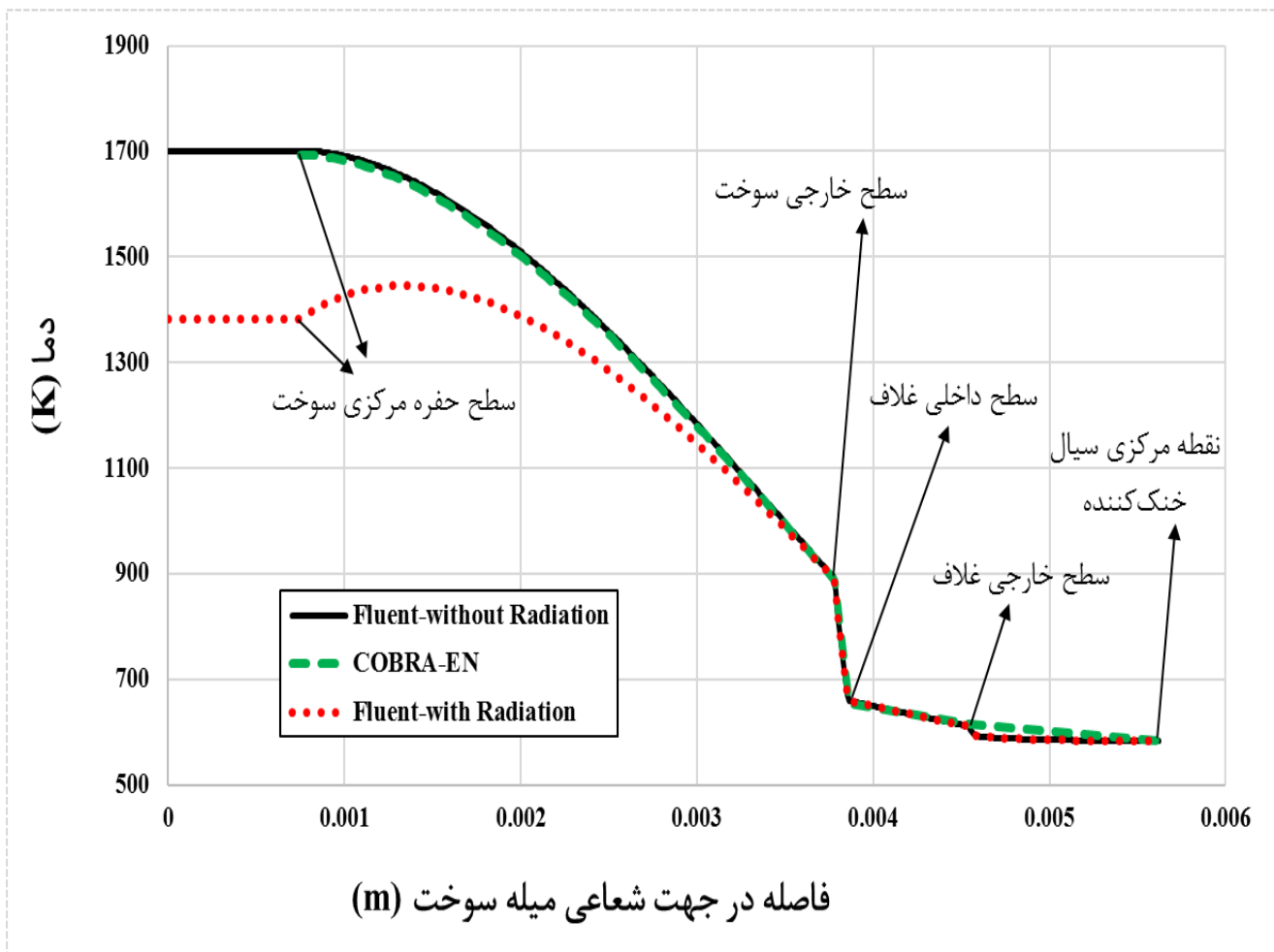
$$Re = \frac{\rho v D_h}{\mu} = \frac{\rho v (4A)}{\mu P} = \frac{4\dot{m}}{\mu P} = \frac{4 \times 0.30725}{92.095 \times 10^{-6} \times \pi \times 0.0091} = 466790 \quad (8)$$

(روش حجم محدود) را نشان می‌دهد. در شکل (۴) توزیع دمای محوری در بخش داغ میله سوخت در جهت شعاعی از حفره داخلی میله سوخت تا دمای سیال خنک‌کننده نشان داده شده است همانطور که از نمودار ملاحظه می‌گردد دما در نقطه داخلی ماکزیمم می‌باشد که در جهت شعاعی رفته رفته با توجه به ضریب هدایت پایین سوخت یک گرادیان دمایی نسبتاً شدیدی ایجاد می‌گردد همچنین با توجه به ضریب هدایت حرارتی پایین هلیوم که در بخش گپ سوخت تزریق شده است خود باعث تضعیف انتقال حرارت شده در نتیجه در بخش گپ کاهش دما دارای شیب تندی تا سطح داخلی غلاف می‌باشد و بعد از آن حرارت از سطح خارجی غلاف به سیال خنک‌کننده که در کانال جریان دارد انتقال می‌یابد.

$SST K-\omega$ یک سطح آشفتگی بزرگی را در نواحی با تنش نرمال زیاد مانند نواحی سکون و یا نواحی با شتاب زیاد، تولید می‌کنند. این توانایی $SST K-\omega$ یک مزیت و برتری را نسبت به مدل کا-اِپسیلون بیان می‌کند.

۵- نتایج

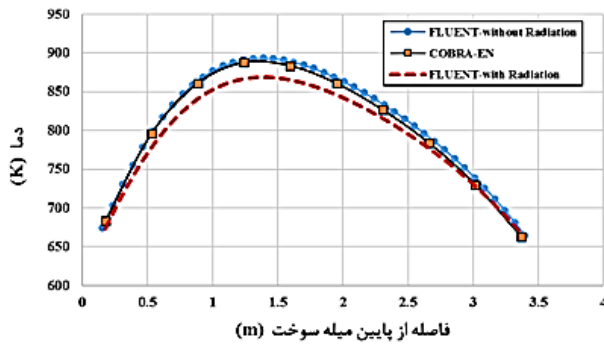
به منظور اطمینان از صحت مدل‌سازی، قسمتی از نتایج مربوط به دماهای سوخت، غلاف و سیال خنک‌کننده با نتایج حاصل از شبیه‌سازی مرجع [۲۷] و [۳۱] مورد مقایسه قرار گرفته و در جدول (۲) به همراه درصد خطا ذکر گردیده است که نتایج حاصله حاکی از شبیه‌سازی دقیق مسئله توسط دو کد COBRA-EN (روش تفاضل محدود) و ANSYS-FLUENT



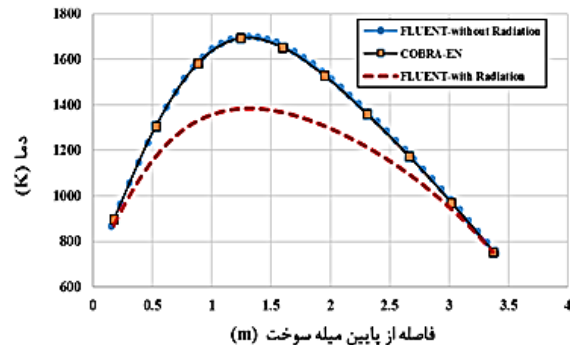
شکل ۴ توزیع دمای شعاعی در میله سوخت

می‌گردد دمای محوری سوخت رابطه مستقیمی با مقادیر ضرایب قدرت محوری دارد و در نقطه‌ای که مقدار ضریب قدرت محوری ماکزیمم باشد (نود ۱۴م) در نتیجه در آن المان دمای سوخت ماکزیمم مقدار می‌باشد.

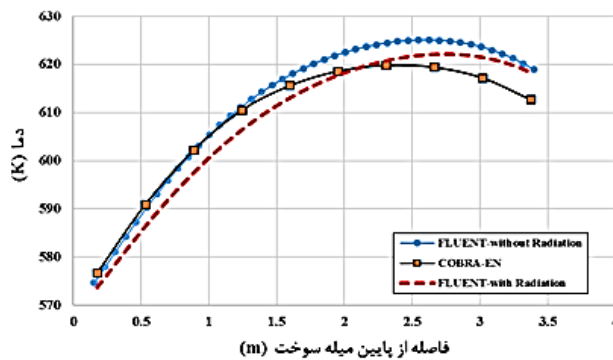
همچنین نمودار توزیع دمایی محوری در طول میله سوخت در شکل (۵) در ۴ بخش از میله سوخت، الف) سطح داخلی سوخت، ب) سطح خارجی سوخت، ج) سطح داخلی غلاف و د) سطح خارجی غلاف نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه



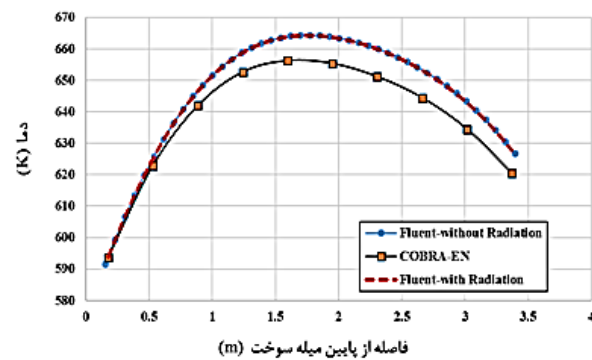
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

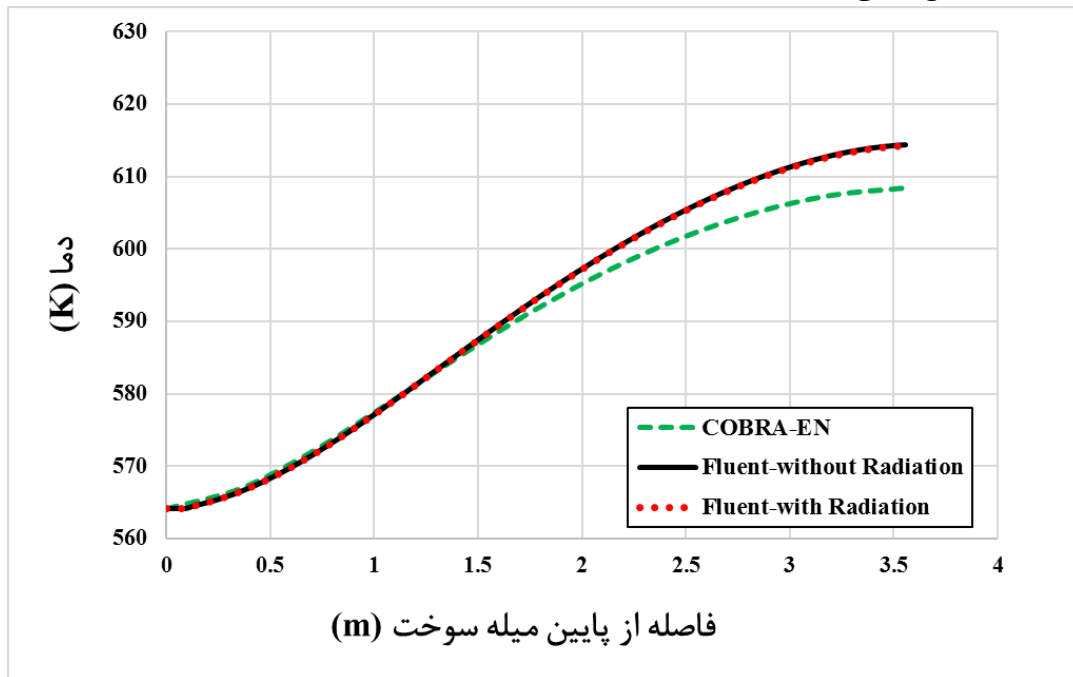
شکل ۵ توزیع دمای محوری در بخش‌های مختلف میله سوخت: الف) سطح داخلی سوخت، ب) سطح خارجی سوخت، ج) سطح داخلی غلاف و د) سطح خارجی غلاف

جدول ۲ محاسبات ترموهیدرولیکی برای مجتمع سوخت انتخابی و میله سوخت داغ برای قلب راکتور بوشهر

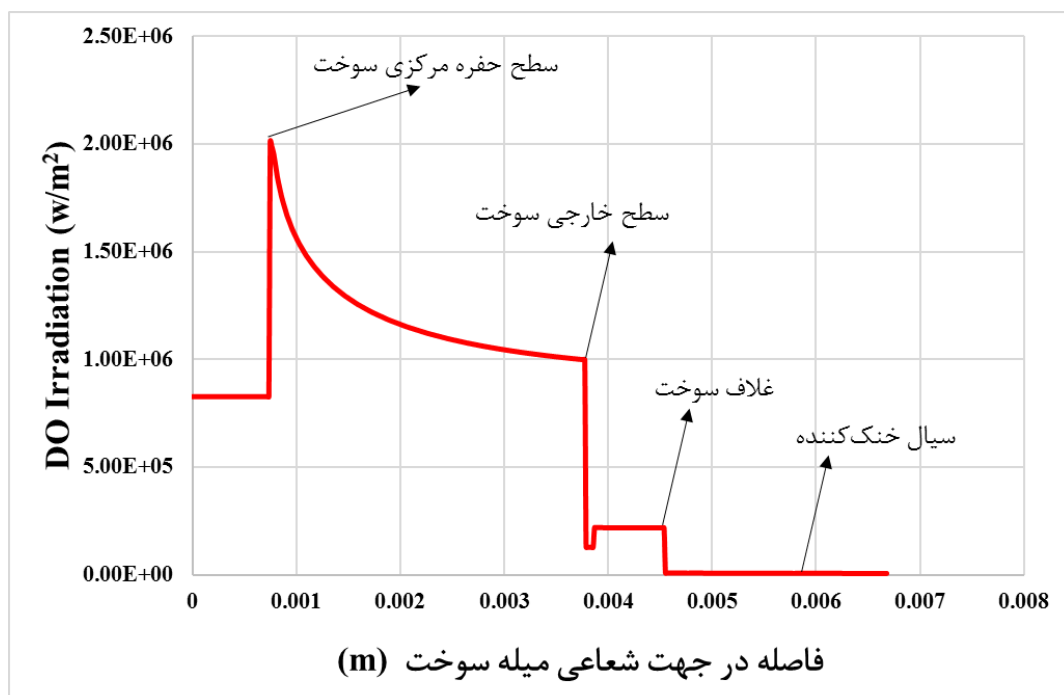
نتایج گزارش شده FSAR [۴۵] در	COBRA-EN [۴۰] با جریان عرضی	فلوئنت بدون [۴۶] تشعشع	فلوئنت با تشعشع	پارامترهای ترموهیدرولیکی
	(۴)	(۲)	(۱)	
۲۱۵۶/۵ <	۱۶۹۳/۷	۱۷۰۱	۱۴۴۵/۷	ماکزیمم دمای داخلی سوخت (K)
---	۸۸۷/۸	۸۹۱/۴	۸۶۶/۸	ماکزیمم دمای سطح خارجی سوخت (K)
---	۶۶۸/۱	۶۶۱/۳	۶۶۰	ماکزیمم دمای سطح داخلی غلاف (K)
۶۲۵/۱۵ <	۶۲۰/۱۵	۶۲۰	۶۱۲	ماکزیمم دمای سطح خارجی غلاف (K)
---	۱۲۸۷/۷	---	---	ماکزیمم دمای متوسط سوخت (K)
۰/۹۶۳ <	۰/۲۹۳	---	---	متوسط ماکزیمم آنتالپی شعاعی سوخت (MJ/kg)
---	۵۸۷/۹۲	۵۹۲/۲	۵۹۱/۱	متوسط دمای خنک کننده در کانال (K)
---	۶۰۶/۲۸	۶۱۴/۳	۶۱۴/۲	دمای خنک کننده در خروجی کانال (K)
---	۰/۲۵۱	---	---	میزان افزایش آنتالپی خنک کننده در طول کانال (MJ/kg)
---	۱/۱۷۷	---	---	ماکزیمم شار حرارتی (MW/m ²)
---	EPRI	---	---	مدل شار حرارتی بحرانی
۱/۷۵ >	۱/۸۶	---	---	مینیمم DNBR برای میله سوخت داغ
---	---	۵/۹۲	۵/۹۲	متوسط سرعت محوری سیال در طول کانال (m/s)

نشان داده شده است. همانطور که در نمودار مشاهده می‌گردد میزان انرژی حرارتی در سطح داخلی سوخت به دلیل دمای بالا ماکزیمم می‌باشد و با نزدیک شدن به سطح خارجی سوخت به دلیل کاهش دما روند نزولی پیدا می‌کند. در شکل (۸) هم کانتورهای دمایی و تشعشعی در بخش‌های حفره مرکزی، سوخت، گپ هلیوم، غلاف و سیال خنک‌کننده میله سوخت به صورت برش محوری نشان داده شده است.

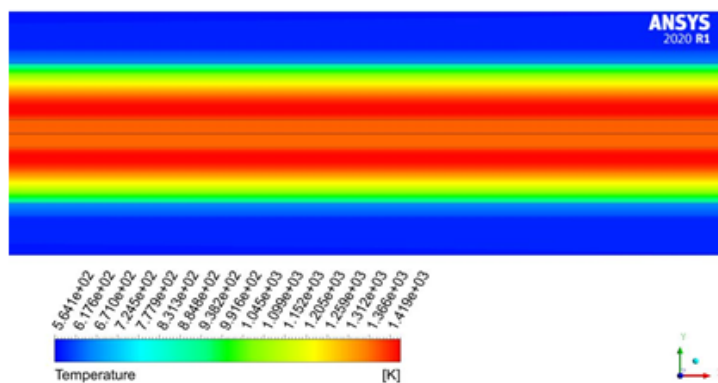
در شکل (۶) تغییرات دمای سیال خنک‌کننده در طول کانال نشان داده شده است، دمای سیال خنک‌کننده مطابق شکل در پایین میله سوخت و ورودی کانال ۵۶۴/۱۵ کلوین بوده و در طول میله سوخت با برداشت حرارت از سطح غلاف سوخت افزایش پیدا می‌کند. بیشینه دمای سیال خنک‌کننده در بالای میله سوخت ۶۰۶ کلوین توسط کد COBRA-EN و ۶۱۴ کلوین توسط نرم‌افزار فلوئنت محاسبه شده است. در شکل (۷) هم تغییرات شار حرارتی ناشی از مدل تشعشعی DO در بخش شعاعی میله سوخت از سطح داخلی سوخت تا سیال خنک‌کننده



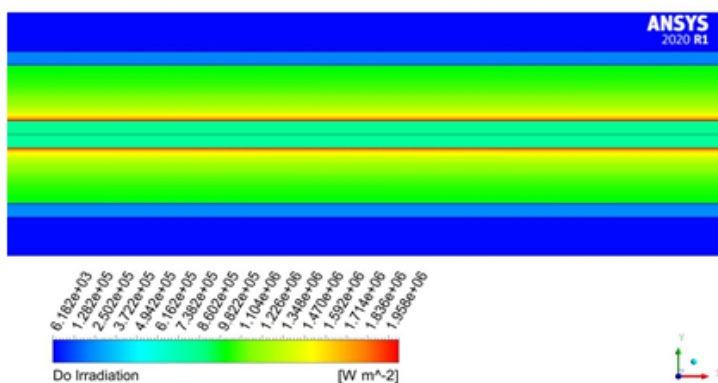
شکل ۶ تغییرات دمای سیال خنک‌کننده در طول کانال



شکل ۷ تغییرات شار حرارتی ناشی از تشعشع مدل DO در بخش شعاعی میله سوخت



(الف)



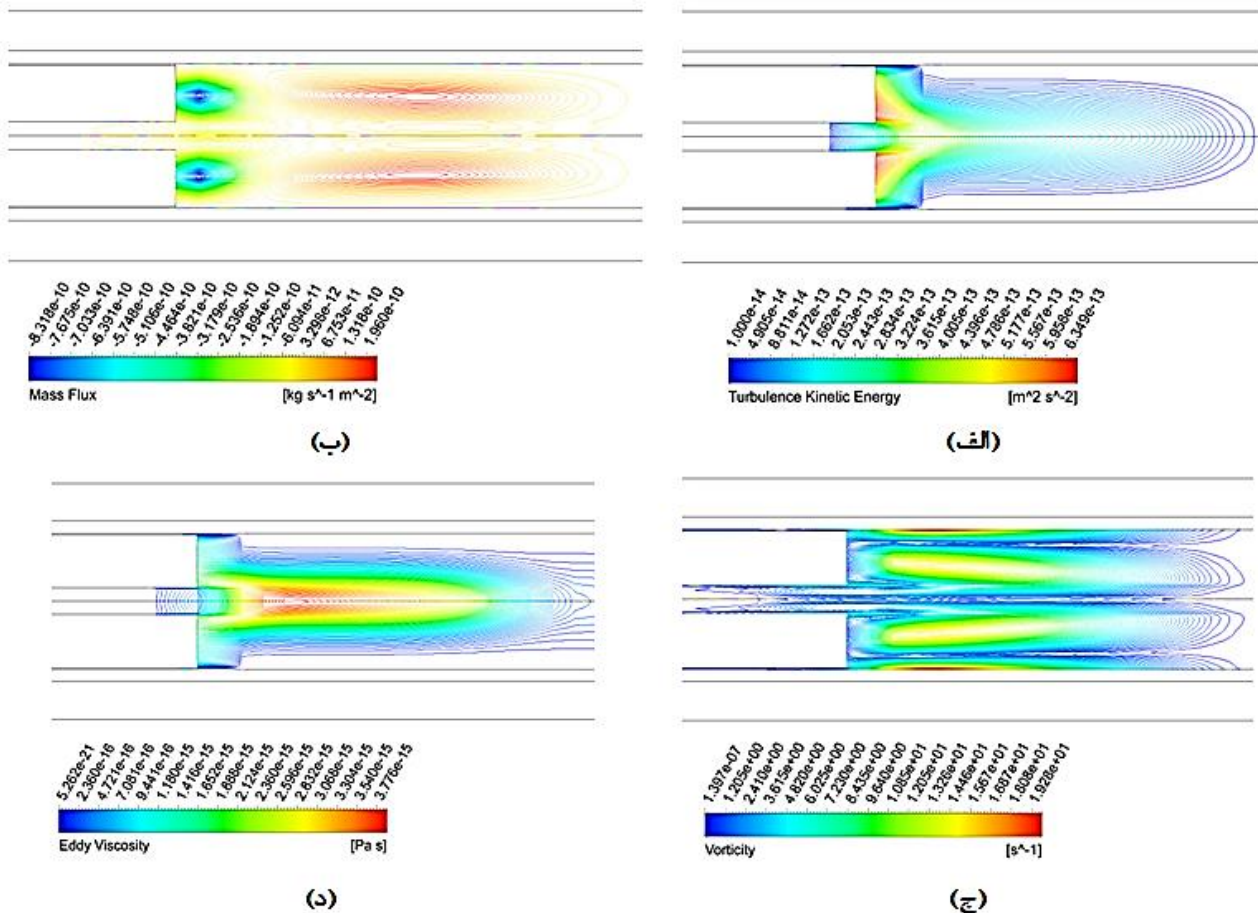
(ب)

شکل ۸ (الف) کانطور تغییرات دمایی میله سوخت در بخش ماکزیمم دمایی سوخت، (ب) کانطور تغییرات شار تشعشی

در این مقاله آنالیز ترموهیدرولیک به روش تک کانال برای میله سوخت داغ راکتور هسته‌ای بوشهر VVER-1000 در شرایط قدرت اسمی با در نظر گرفتن پدیده تشعشع مدلسازی شده است. در کارهای قبلی انجام شده اغلب از اثر پدیده انتقال حرارت تشعشی صرف نظر شده است، ولی در این پژوهش تاثیر انتقال حرارت تابشی در کنار انتقال حرارت جابجایی باهم بررسی گردیده است. مدل تشعشع استفاده شده در لایه های مختلف میله سوخت از نوع جهات مجزا (DOM) می باشد همچنین توزیع توان خطی (بر واحد طول میله) را از مرجع [۴۰] استخراج کرده و در نرم افزار ANSYS FLUENT وارد شده است. و نتایج بدست آمده در حالت پایا با نتایج حالت بدون در نظر گرفتن تشعشع، نتایج کد COBRA-EN و گزارش آنالیز ایمنی راکتور بوشهر مقایسه شده است که مبین سازگاری خوب نتایج حاصله با نتایج مرجع می باشد. همانطور که از نتایج به دست آمده مشاهده می گردد با در نظر گرفتن انتقال حرارت تشعشی ماکزیمم دمایی سوخت ۲۵۰ درجه سلسیوس کاهش یافته است. همچنین در این مدل سازی پارامترهای مربوط به گاز هلیوم محبوس در حفره مرکزی سوخت و در فضای بین سوخت و غلاف از جمله تغییرات دما، آشفستگی و ویسکوزیته آن بررسی گردید.

در شکل ۹- از (الف) تا (د) به ترتیب نمودارهای مربوط به انرژی جنبشی آشفستگی توربولانس، تغییرات شار جرمی گاز هلیوم، گردابه وادی ویسکوزیته گاز هلیوم درون پلنوم را نشان می دهد. که انرژی جنبشی آشفستگی (TKE) میانگین انرژی جنبشی در واحد جرم مرتبط با گرداب ها در جریان آشفته گاز هلیوم را نشان می دهد و در محل اتصال حفره مرکزی و گپ به پلنوم بالایی به دلیل تغییر سطح مقطع تغییرات سرعت زیاد می باشد در نتیجه مقدار آن نیز افزایش می یابد. تغییرات شار جرمی ایجاد شده در محل اتصال سوخت به پلنوم بالایی در اثر تغییرات سرعت و دانسیته گاز هلیوم می باشد. همچنین گردابه ایجاد شده از حرکت چرخشی محلی گاز هلیوم در نزدیکی نقطه اتصال سوخت و پلنوم کاملا مشهود می باشد. و این یک کمیت مهم در تئوری دینامیک سیالات است و چارچوب مناسبی برای درک انواع پدیده های پیچیده جریان، مانند تشکیل و حرکت حلقه های گردابی را فراهم می کند.

۶- نتیجه گیری



شکل ۹ الف) نمودار تغییرات چگالی گاز هلیوم در راستای محوری ب) کانتور تغییرات چگالی گاز هلیوم ج) تغییرات فشار دینامیکی گاز هلیوم و د) تغییرات سرعت گاز هلیوم در میله سوخت

علائم یونانی	
ρ	چگالی، kg/m^3
v	سرعت، m/s
ψ	ضریب عدد ناسلت
μ	ویسکوزیته، N.s/m
λ	ضریب ویسکوزیته ثانویه
زیرنویس ها	
in	ورودی
j	خروجی
g	بخار
f	آب
h	هیدرولیکی
i	ورودی

فهرست علائم و اختصارات

علائم انگلیسی	
T	دما، $^{\circ}\text{C}$
P	فشار، Pa
X	کیفیت بخار در ورودی
h	آنتالپی تبخیر، J/kg
K	ضریب هدایت حرارتی سوخت، w/m.K
t	زمان، s
q	توان، W
Nu	عدد ناسلت
Re	عدد رینولدز
Pr	عدد پراتل
Gr	عدد گرافش
C	ظرفیت حرارتی ویژه سوخت، $\text{J/kg.}^{\circ}\text{C}$
G	شار جرمی سیال، $\text{kg/m}^2.\text{s}$
D	قطر، m
A	مساحت، m^2
\dot{m}	دبی جرمی، kg/s
α	ضریب خلاء

۷- مراجع

- [1] Marakis, J., Papapavlou, C., Kakaras, E., A parametric study of radiative heat transfer in pulverised coal furnaces, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43 (16), pp. 2961–

- porous channel, *International Journal of Thermofluids*, Vol. 9, pp. 501-520, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100062>, (2021).
- [11] Singh, A.K., Paul, T., Transient natural convection between two vertical walls heated/cooled asymmetrically, *International Journal of Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 11, pp. 143-154, (2006).
- [12] Mehta, R., Jangid, S., Kumar, M., Comparative mathematical study of MHD mixed convection flow of nano-fluids in the existence of porous media, heat generation and radiation through upstanding equidistant plates, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 46, pp. 2240-2248, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.577>, (2021).
- [13] Lakhi, M., Safavinejad, A., Numerical investigation of combined heat transfer (mixed convection-radiation) in 2D channel using the LBM, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 126, pp. 201-222, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2021.105368>, (2021).
- [14] Sakly, A., Ben Nejma, F., Heat and mass transfer of combined forced convection and thermal radiation within a channel: Entropy generation analysis, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 171, pp. 114-132, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.114903>, (2020).
- [15] Javadzadegan, A., Motaharpour, S.H., Moshfegh, A., AliAkbari, O., Hassanzadeh Afrouzi H., Toghraie, D., Lattice-Boltzmann method for analysis of combined forced convection and radiation heat transfer in a channel with sinusoidal distribution on walls, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Vol. 526, pp. 119-135, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2019.121066>, (2019).
- [16] Mandal, S.K., Arnab, D., Dipak, S., Mixed convective heat transfer with surface radiation in a rectangular channel with heat sources in presence of heat spreader, *Thermal Science and Engineering Progress*, Vol. 14, pp. 23-35, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2019.100423>, (2019).
- [17] Prakash, O., Singh, S.N., Experimental and numerical study of mixed convection with surface radiation heat transfer in an air-filled ventilated cavity, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 171, pp. 59-72, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.107169>, (2022).
- 2971, DOI: [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(99\)00347-6](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(99)00347-6), (2000).
- [2] Spinnler, M., Winter, E.R., Viskanta, R., Studies on high-temperature multilayer thermal insulations, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47 (6-7), pp. 1305-1312, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2003.08.012>, (2004).
- [3] Mezrhab, A., Bouali, H., Amaoui, H., Bouzidi, M., Computation of combined natural-convection and radiation heat-transfer in a cavity having a square body at its center, *Appl. Energy*, Vol. 83, pp. 1004-1023, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2005.09.006>, (2006).
- [4] Vivek, V., Sharma, A.K., Balaji, C., Interaction effects between laminar natural convection and surface radiation in tilted square and shallow enclosures, *Int. J. Therm. Sci.*, Vol. 60, pp. 70-84, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2012.04.021>, (2012).
- [5] Martyushev, G., Sheremet, A., Conjugate natural convection combined with surface thermal radiation in a three-dimensional enclosure with a heat source, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 73, pp. 340-353, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.02.009>, (2014).
- [6] Menguc, M.P., Viskanta, R., Radiation heat transfer in combustion systems, *Prog Energy Combust Sci.*, Vol. 13(2), pp. 97-160, DOI: [https://doi.org/10.1016/0360-1285\(87\)90008-6](https://doi.org/10.1016/0360-1285(87)90008-6) (1987).
- [7] Yang, K.T., Numerical modeling of natural convection-radiation interactions in enclosures, *Int. Heat Transfer Conf.*, Vol. 2, pp. 131-140, (1986).
- [8] Anil Kumar Sharma, K., Velusamy, C., Balaji, S.P., Conjugate turbulent natural convection with surface radiation in air filled rectangular enclosures, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 625-639, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.07.022>, (2007).
- [9] Modest, M.F., Mazumder, S., Chapter 21 - Radiation Combined with Conduction and Convection, Radiative Heat Transfer (Fourth Edition), *Academic Press*, pp. 775-817, DOI: <https://doi.org/10.1016/C2018-0-03206-5>, (2022).
- [10] Ajibade, O.A., Jha, B.K., Jibril, H.M., Bichi, Y.A., Effects of dynamic viscosity and nonlinear thermal radiation on free convective flow through a vertical

- [26] Dorosti. Gh., Marefat, M., Analysis of combined natural convection and radiation heat transfer in finned vertical chambers, *Iranian Mechanical Engineering Research Journal*, Tehran, (2009), (in persian).
- [27]. Chui, E. H., Raithby, G.D., Computation Of Radiant Heat Transfer On A Nonthogonal Mesh Using Finite-Volume Method, *Number. Heat Transfer. Part B*. Vol. 23. pp. 269-228, DOI: <https://doi.org/10.1080/10407799308914901>, (2011).
- [28]. Chai, J. C., Lee, H. S., Finite-Volume Method For Radiation Heat Transfer, *J. Thermophys.*, Vol. 8, pp. 419-425, DOI: <https://doi.org/10.2514/3.559>, (2014).
- [29]. Kuehn, T. H., Goldstein, R. J., An Experimental And Theoretical Study Of Natural Convection In The Annulus Between Horizontal Concentric Cylinders, *J. Fluid Mech.*, Vol. 100. Pp. 695-719, DOI:<https://doi.org/10.1017/S0022112076002012>, (2010).
- [30]. Kuehn, T. H., Goldstein, R. J., An Experimental And Theoretical Study Of Natural Convection Heat Transfer In Concentric And Eccentric Horizontal Cylindrical Annuli, *J. Heat Transfer.*, Vol. 100, pp. 635-640, DOI: [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(80\)90071-X](https://doi.org/10.1016/0017-9310(80)90071-X), (2009).
- [31]. Cho, C. H., Chang, K. S., Numerical Simulation Of Natural Convection In Concentric And Eccentric Horizontal Cylindrical Annuli. *J. Heat Transfer*, Vol. 104, pp. 624-630, DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3245177>, (2011).
- [32] Wang, Q., Chen, X., Yi-chong, X., Accident like the Fukushima unlikely in a country with effective nuclear regulation: literature review and proposed guidelines, *Renew. Sustain. Energy Rev*, Vol. 17, pp. 126-146, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.09.012>, (2013).
- [33] Mochizuki, H., Analysis of the chernobyl accident from 1:19:00 to the first power excursion, *Nucl. Eng. Des.*, Vol. 237, pp. 300-307, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2006.07.002>, (2007).
- [34] U.S. Nrc, Backgrounder on the three mile island accident, *United State Nucl. Regul. Comm.*, pp. 1-7, (2108).
- [35] IAEA, Thermophysical properties database of materials for light water reactors and heavy water reactors, *Int. Atom. Energy Agency*, (2006). http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/37/118/37118326.pdf.
- [18] Akinshilo, A.T., Mixed convective heat transfer analysis of MHD fluid flowing through an electrically conducting and non-conducting walls of a vertical micro-channel considering radiation effect, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 156, pp. 506-513, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.100>, (2019).
- [19] Hamdy H., Shafey, N.Y., 3D study of convection-radiation heat transfer of electronic chip inside enclosure cooled by heat sink, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 12, pp. 106-115, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2020.106585>, (2021).
- [20] Nee, A., Hybrid lattice Boltzmann—Finite difference formulation for combined heat transfer problems by 3D natural convection and surface thermal radiation, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 173, pp. 202-209, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2020.105447>, (2020).
- [21] Mikhailenko, S.A., Sheremet, M.A., Natural convection combined with surface radiation in a rotating cavity with an element of variable volumetric heat generation, *Energy*, Vol. 210, pp. 118-128, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118543>, (2020).
- [22] ForuzanNia, M., Ansari, A.B., Gandjalikhan S.A., Transient combined volumetric radiation and free convection in a chamber with a hollow heat-generating solid body, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 119, pp. 104-110, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2020.104937>, (2020).
- [23] Han, C.Y., Beak, S.W., Natural Convection Phenomena Affected By Radiation In Concentric And Eccentric Horizontal Cylindrical Annuli, *J. Heat Transfer. Part A*, Vol. 36, pp. 473-488, (2011).
- [24] Dehgoshayi, A., Ganghi, D., Numerical investigation of combined heat transfer of convection and radiation inside a closed and horizontal chamber, *The third national conference of knowledge and technology of mechanical and electrical engineering of Iran*, (2017), (in persian).
- [25] Rahmati, A.R., Karimpoor, R., Numerical simulation of natural convection heat transfer with radiation in a blocked square enclosure, *The third national conference of knowledge and technology of mechanical and electrical engineering of Iran*, (2015), (in persian).

- [42] Freile, R., Tano, M., Balestra, P., Improved natural convection heat transfer correlations for reactor cavity cooling systems of high-temperature gas-cooled reactors: from computational fluid dynamics to Pronghorn, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 163, pp. 108-116, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108547>, (2021).
- [43] Hanisch, T., Zedler, P., Hurtado, A., Numerical and experimental analysis of flow and heat transfer in a fuel assembly mock-up with transverse flow above the rods, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 89, pp. 95-103, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2021.108809>, (2021).
- [44] Tikadar, A., Najeeb, U., Paul, T. C., Oudah, S. K., Salman, A. S., Abir, A. M., Carrilho, L. A., Khan, J. A., Numerical investigation of heat transfer and pressure drop in nuclear fuel rod with three-dimensional surface roughness, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 126, pp. 493-507, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.141>, (2018).
- [45] Russia Federal Agency on Nuclear Energy, *Bushehr NPP FINAL SAFETY ANALYSIS REPORT*, Moscow, (2005).
- [46] Sadeghiazad, M.M., Choobdar, F., Investigation of heat transfer in the hot fuel rod of the nuclear power reactor, *The scientific journal of the Iranian Society of Mechanical Engineers*, Vol. 31, pp. 61-74, DOI: [10.30506/mmep.2022.563608.2058](https://doi.org/10.30506/mmep.2022.563608.2058), (2022), (in persian).
- [36] IAEA, Computational analysis of the behaviour of nuclear fuel under steady state, transient and accident conditions, *Int. Atom. Energy Agency*, (2007). <https://www.taodocs.com/p-50010983.html>.
- [37] Wilhelm, P., Jobst, M., Severe accident research activities at Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR), *Kerntechnik*, Vol. 81, pp. 134-137, DOI: <https://doi.org/10.3139/124.110691>, (2016).
- [38] Aounallah, Y., Simulation of HALDEN IFA-650 loss-of-coolant accidents tests with TRACE, *Kerntechnik*, Vol. 77, pp. 316-323, DOI: <https://doi.org/10.3139/124.110214>, (2012).
- [39] Horhoianu, G., Serbanel, M., Diaconu, C., Investigation of the Ru-43LV fuel behaviour under LOCA conditions in a CANDU reactor, *Kerntechnik*, Vol. 77, pp. 356-364, DOI: <https://doi.org/10.3139/124.110210>, (2012).
- [40] Faghihi, F., Mirvakili, S.M., Safaei, S., and Bagheri, S., Neutronics and sub-channel thermal-hydraulics analysis of the Iranian VVER-1000 fuel bundle, *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 87, No. 6, pp. 39-46, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2015.10.020>, (2016).
- [41] Sadeghiazad, M.M., Choobdar, F., Investigation of thermal-hydraulic transient analysis of hot fuel rod in the pump failure accident, *International Journal of Nuclear Energy Science and Technology*, Vol. 14, pp. 264-279, DOI: <https://doi.org/10.1504/IJNEST.2020.115925>, (2021).