الحاق معادلات دینامیک نوترون به ANSYS-CFX جهت مطالعه در گذره های توان با در نظر گرفتن مصرف سوخت

شریفیان دوایی، محمدحسین [۱]– آقایی، مهدی*[۲] –ذوالفقاری، احمدرضا[۳]

دانشگاه شهید بهشتی ، دانشکده مهندسی هسته ای ، گروه چرخه سوخت

چکیده:

با توجه به اهمیت بررسی ایمنی راکتورهای هسته‌ای، در این مقاله جهت بررسی رفتار ترمونوترونیک قلب راکتور هسته‌ای بوشهر در گذره‌های توان، معادلات دینامیک نوترون همراه با فیدبک‌های حرارتی سوخت و سیال با روشی نوین به نرم افزار معتبر ANSYS-CFX بصورت زیر روال نویسی در محیط فورترن الحاق شده‌اند. جهت محاسبه دمای میله سوخت در راستای شعاعی و محوری نیز معادله انتقال حرارت بصورت عددی به ANSYS-CFX اضافه شده است. در ضمن با توجه به تغییر خواص ترمومکانیکی سوخت بر اثر تشعشع و مصرف، زیرروال‌هایی جهت در نظر گرفتن تاثیر میزان فرسایش سوخت و تخلخل در خواص سوخت در نظر گرفته شده‌اند. به این ترتیب در این مقاله روشی نوین جهت بررسی سه بعدی رفتار ترموهیدرولیکی قلب راکتورهای آب تحت فشار ارائه شده است. نتایج محاسبات دقت این روش در شبیه سازی‌های گذره توان را اثبات‌می‌نماید.

کلمات کلیدی: *دینامیک سیالات محاسباتی ، دینامیک نوترون ، CFX ، مجتمع سوخت ، فورترن ، FRAPCON .*

مقدمه :

دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) روشی بر مبنای تبدیل معادلات دیفرانسیل پاره‌ای حاکم بر سیالات به معادلات جبری است که امکان حل عددی این معادلات را فراهم می آورد. با تقسیم ناحیه مورد نظر برای تحلیل به المان‌های کوچک‌تر و اعمال شرایط مرزی برای گره‌های مرزی و با اعمال تقریب‌هایی، یک دستگاه معادلات خطی بدست می‌آید که با حل این دستگاه معادلات جبری، میدان سرعت، فشار و دما در ناحیهٔ مورد نظر بدست می‌آید. با استفاده از نتایج بدست آمده از حل معادلات می‌توان برآیند نیروهای وارد بر سطوح، ضرایب برا و پسا و ضریب انتقال حرارت را محاسبه نمود[۱]. در سال ۲۰۱۰ Brian L. Smith گزارشی ارائه نمود که حاصل تحقیقات ٤ ساله سه گروه بود که با حمایت آژانس بین المللی انرژی اتمی، در مورد نقش کنونی و آینده‌ی نرم افزارهای CFD در بررسی مشکلات ایمنی راکتورهای هسته ای پرداخته بودند[۲] . در سال ۲۰۱۵ Zhao Chen و همکارانش به بررسی معادله سینتیک نوترونی و انتقال حرارتی یک راکتور LMFR با استفاده از روش CFD و استفاده از نرم افزار FLUENT و کد PKM پرداختند[۳]. در سال ۲۰۱٤ Ladislav Vyskocil و همکارش با الحاق کد سنتیک نوترونی Dyn3D و نرم افزار FLUENT شکستن

یکی از خط لوله های خنک کننده در یک راکتور VVER-1000 را شبیه سازی کردند [٤]. و در سال ۲۰۱۲ C. Pena-Monferrer و همکارانش به مدلسازی یک چهارم از مجتمع سوخت PWR به وسیله نرم افزار CFX پرداختند که به آن آب سرد تزریق می شد واین شبیه سازی را در حالت پایا و گذرا انجام داده و نتیجه های حاصل را با استفاده از الحاق کدهای نوترونی RELAP5 و PARCS v2.7 تصدیق کردند[٥]. در این مقاله تلاش شده که یک مجتمع سوخت VVER1000 با استفاده از بهترین تقارن ممکن به وسیله‌ی نرم‌افزار CFX شبیه سازی شده، همچنین معادله دینامیک نقطه‌ای نوترون و محاسبات فرسایش سوخت به وسیله زبان برنامه نویسی فورترن نوشته شده و این برنامه ها در یک حل همزمان، سیستم مورد نظر را در حالت های پایا و گذرا شبیه سازی کنند.

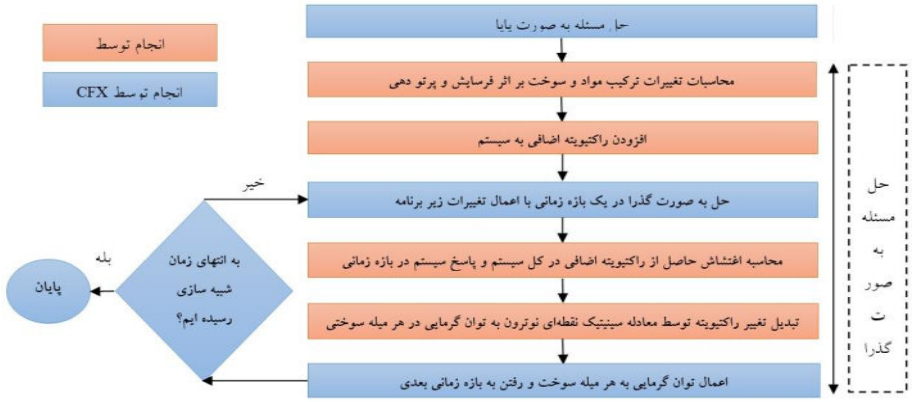
روش کار :

این شبیه سازی با استفاده از ANSYS 15.0 که یکی از نرم‌افزارهای پرقدمت در تحلیل‌های CFD است و به دلیل توانمندی بالا و قابلیت کاربری آسان، کاربران بسیاری دارد انجام گردیده است. نوع حل این نرم افزار بر پایه دیدگاه حجم محدود و میان‌یابی المان‌محدود، با مقادیر ذخیره‌شده در گره‌های محاسباتی می باشد. به دلیل استفاده از حل‌گر کوپل و ذخیره‌سازی مقادیر در نقاط شبکه، نیازمند حافظه موقت بالاتری نسبت به نرم‌افزار فلوئنت است. همچنین به دلیل استفاده از روش حل کوپل شبه‌گذرا در فیزیک‌های پایا، از همگرایی نسبتا بالاتری در مقایسه با فلوئنت برخوردار است[٦]. جهت افزودن معادلات دینامیک نوترون و فیدبک‌های حرارتی و همچنین معادله انتقال حرارت در مختصات استوانه به شبیه سازی مد نظر، از زبان برنامه نویسی فورترن استفاده گردیده است. در ضمن جهت برقراری انتقال اطلاعات بین فورترن وANSYS پروتکل‌های موردنیاز فعال شده‌اند.

روش شبیه سازی:

برای انجام این شبیه سازی، لازم است که یک مدل دقیق از مجتمع سوخت با تمام ویژگیهایش با دقت مناسبی تهیه گردد. از جمله جزئیاتی که در این کار مورد توجه قرار گرفته است، شکل شبه کسینوسی شار گرمایی است. بدین منظور اطلاعات موجود در فصل چهارم گزارش ایمنی راکتور بوشهر (FSAR) استخراج گردیده و شار گرمایی معادل هر میله سوخت در غالب این شکل در راستای طول میله به مدل شبیه سازی

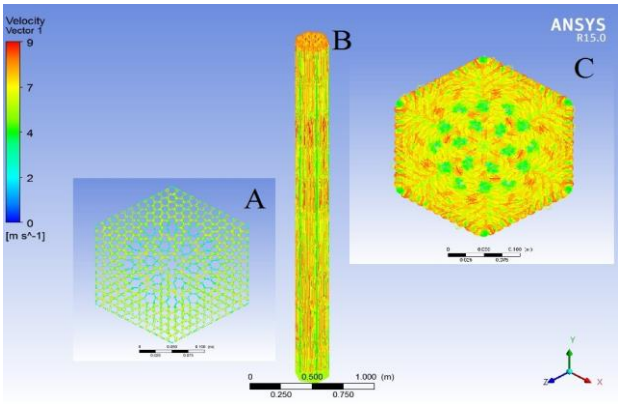
شده الحاق گردید. در اقدامی دیگر برای پیشگیری از نیاز به یک سیستم بسیار قوی، از شکلی با حداکثر میزان تقارن استفاده شده است. بدین منظور یک ششم از یک مجتمع سوخت رسم شده که بدین ترتیب، با استفاده از قابلیتی که نرم افزار CFX در اختیار کاربر قرار می دهد، مابقی شکل به صورت پریودیک در کنار آن قرار می گیرد. در قسمت دیگر این شبیه سازی، برنامه ای به زبان فورترن نوشته شده که مهمترین وظایف آن، در قدم اول محاسبه ی خواص مواد موجود در شبیه سازی با توجه به میزان فرسایش سوخت می باشد. واضح است که سوخت پس از قرار گرفتن در راکتور و پرتودهی، دستخوش تغییراتی می گردد، محصولاتی در اثر شکافت تولید می شوند که خود سبب تغییر در خواص مواد می گردد. از جمله مهمترین این تغییرات می توان به تغییر در ترکیب سوخت و تغییر در ترکیب گاز پرکننده فاصله میان سوخت و غلاف اشاره کرد. این تغییرات در کدهای مختلف هسته ای مورد بررسی قرار گرفته اند. در این شبیه سازی از روابط ارائه شده در کد هسته ای FRAPCON استفاده شده که به زبان فورترن، برنامه نویسی گردیده است. همچنین این برنامه به بررسی تغییرات توان گرمایی با گذر زمان پرداخته است. بدین منظور از معادله‌ی سینتیک نقطه‌ای به صورت ٦ گروهی استفاده گردیده است. بنابراین در هر بازه زمانی برای حل گذرا، مقادیر تغییرات راکتیویته سیستم محاسبه مجدد می شود و با استفاده از معادله‌ی سینتیک نقطه‌ای، تغییرات معادل آن به توان گرمایی راکتور محاسبه و اعمال می گردد.



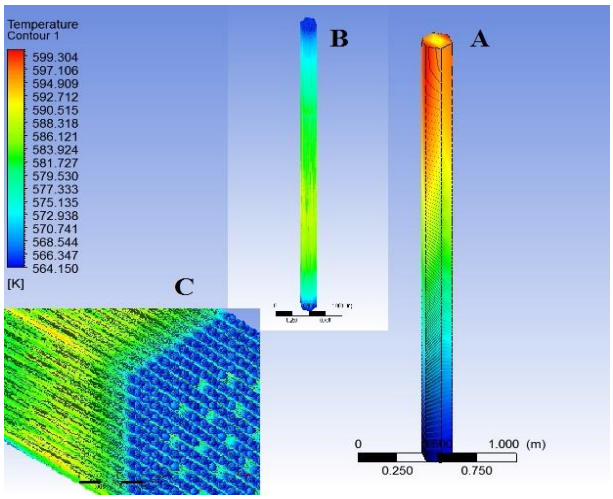
شکل شماره (۱): الگوریتم شبیه سازی به روش الحاق نرم افزارهای CFX و FORTRAN

نتایج :

برای این شبیه سازی، مجتمع سوخت راکتور VVER1000 در محیط نرم افزار مدلسازی شده است. بعد از انجام مدلسازی در ابتدا حالت پایای برداشت حرارت از قلب راکتور با توجه عبور سیال از میان مجتمع‌های سوخت شبیه‌سازی شد. با توجه به وابستگی توامان فیدبک های حرارتی و تولید حرارت در محاسبات دینامیک و گذرا، دمای سوخت و سیال در هر نقطه، سطح و در هر بازه زمانی توسط نرم افزار CFX و زیرروال‌ها محاسبه می گردد و توسط دستورهای تعریف شده در زیر برنامه‌ها، به صورت دو سویه منتقل می گردند. بنابراین هر ویژگی مورد نظری از سیستم، به صورت همزمان به زیربرنامه وارد شده و هر محاسبه‌ای نیز از زیر برنامه به سیستم انتقال می‌یابد. در نهایت مهمترین قسمت این شبیه سازی، نحوه ایجاد ارتباط مداوم بین زیربرنامه فورترن و شبیه ساز CFX می باشد. این نحوه الحاق سبب مرتفع شدن بسیاری از محدودیت‌های ممکن برای شبیه سازی‌های تخصصی می گردد. شکل‌های ۲ و ۳ اطلاعات سرعت و دما را در حالت شرایط پایا نمایش می‌دهند.

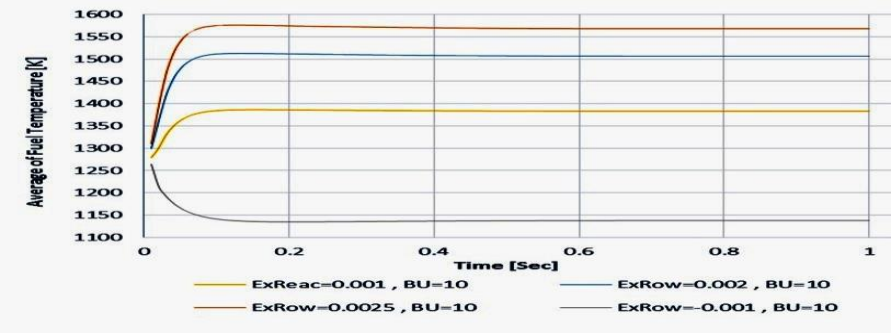


شکل شماره (۲): (A) بردارهای سرعت در راستای طولی و (B,C) بردارهای سرعت با در نظر گرفتن جریانهای عرضی

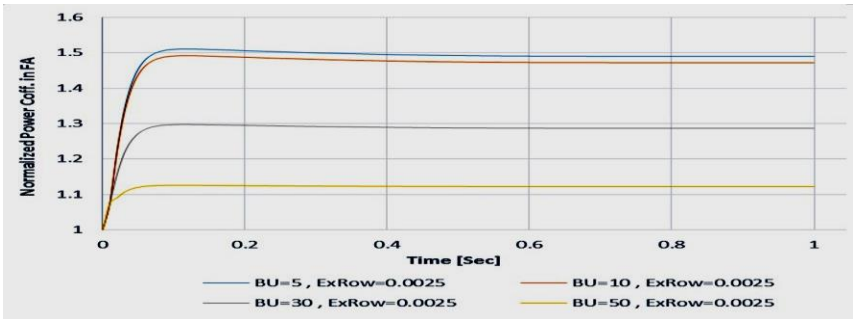


شکل شماره (۳): (A) دمای سیال در مجتمع سوخت و (B,C) توزیع دما در فیلم مرزی ایستای سطح مجتمع سوخت

جهت انجام محاسبات دینامیک، تاثیر تزریق راکتیویته‌های مثبت و منفی در قلب مورد مطالعه قرار گرفتند. نمودار (۱) اثر راکتیویته های اضافه شده به سیستم را بررسی می کند. هرچقدر میزان راکتیویته‌ی اضافه شده به سیستم بزرگتر باشد، پاسخ سیستم به آن که توسط معادله سینیتیک نقطه‌ای محاسبه می گردد نیز بزرگتر خواهد بود، در نتیجه تغییرات متوسط توان نیز بزرگتر خواهد شد که این امر مستلزم بالاتر رفتن تغییرات دمای سوخت می‌باشد. البته مشاهد می‌شود که توان بعد از مدتی ثابت می‌شود که به علت فیدبک‌های حرارتی است.

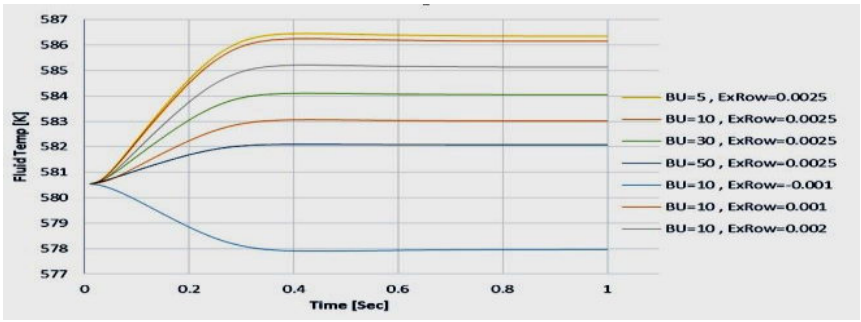


نمودار شماره (۱): تغییرات دمای متوسط سوخت در راکتیویته های متفاوت با فرسایش یکسان در مقطع میانی میله سوخت



نمودار شماره (۲): تغییرات توان گرمایی مجتمع سوخت با توجه به فرسایش‌های متفاوت سوخت در راکتیویته اضافی یکسان

از آنجایی که با افزایش فرسایش در سوخت، اثراتی مانند اثرات پاره‌های شکافت حل شده، اثرات پاره‌های شکافت ته‌نشین شده، اثر تابش دیدن و اثر تخلخل سوخت، همگی باعث کاهش هدایت حرارتی سوخت می گردند. این موضوع باعث کاهش راندمان گرمایی سیستم می‌باشد و بنابراین مطالعه آن دارای اهمیت خاصی است.



نمودار شماره (۳): تغییرات دمای سیال در مقطعی مشخص با توجه به راکتیویته های اضافه شده و فرسایشهای متفاوت

با توجه به اثرات ذکر شده در بالا، هرچه فرسایش سوخت بیشتر باشد، دمای متوسط سوخت بالاتر می رود که در نتیجه دمای سیال نیز افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش راکتیویته اضافه شده، تغییرات توان نیز بزرگتر می‌باشد که این امر نیز سبب افزایش دمای سیال می گردد. هر دو این اثرات در نمودار فوق به خوبی قابل مشاهده می‌باشند.

بحث ونتیجه گیری :

مهمترین نکته قابل توجه در این مقاله، ارائه روشی جدید برای انجام انواع شبیه‌سازی‌های چند فیزیکی در مهندسی هسته‌ای است. با ارائه این روش، با استفاده از CFX که به عنوان یک نرم افزار ذاتا سیالاتی شناخته

می شود، شبیه‌سازی معادلات دینامیک نوترون با در نظر گرفتن فید بک‌های حرارتی انجام پذیرفت. به این ترتیب با استفاده از نتایج دمایی سه بعدی و دارای دقت مناسب نرم افزار CFX توانستیم دقت محاسبات در گذره های توان راکتور را بالا برده و نتایج مناسب استخراج نماییم. در ضمن در این روش محدودیتی برای اعمال انواع معادلات در نرم افزار وجود ندارد. با اعمال راکتیویته های مثبت و منفی تغییرات توان با در نظر گرفتن فیدبکهای حرارتی شبیه سازی شد و اثر تغییرات خواص سوخت در اثر فرسایش مشاهده شد. این گونه شبیه سازی ها سبب شناخت دقیق تر از سیستم مورد استفاده می گردد و در صورت مواجه با چنین حادثه ای، آمادگی کاربر را افزایش خواهد داد.

مراجع :

[1] Ferziger Peric - Computational Methods for Fluid Dynamics, 3rd Ed - 2002
[2] BRIAN L. SMITH , 'ASSESSMENT OF CFD CODES USED IN NUCLEAR REACTOR SAFETY SIMULATIONS' , CH-5232 Villigen PSI, Switzerland (2010).
[3] Zhao Chen , Xue-Nong Chen , Andrei Rineiski , Pengcheng Zhao , Hongli Chen , 'Coupling a CFD code with neutron kinetics and pin thermal models for nuclear reactor safety analyses' , Annals of Nuclear Energy , 83 , 41–49 , (2015).
[4] Ladislav Vyskocil , Jiri Macek , 'Coupling CFD code with system code and neutron kinetic code', Nuclear Engineering and Design , Hlavni 130, 250 68 Husinec , (2014).
[5] C. Pena-Monferrer ˜ , F. Pellacanid, S. Chiva , T. Barrachina , R. Miro , R. Macian-Juan , 'CFD-NEUTRONIC COUPLED CALCULATION OF A PWR FUEL ASSEMBLY CONSIDERING PRESSURE DROP AND TURBULENCE PRODUCED BY SPACER GRIDS', 15, 85748 Garching , (2012).
[٦] احسان اله سعادتی ، مصطفی زین العابدینی ، اصول شبیه سازی مقدماتی و پیشرفته دینامیک سیالات محاسباتی با استفاده از نرم افزارهای CFX و FLUENT ، شرکت مهندسی پرداد پترو دانش ، چاپ اول تابستان ۱۳۹٤