



دانشگاه گیلان

آنالیز نوترونیک - ترموهیدرولیک مجموعه سوخت راکتور بوشهر با کوپل CFD و

MCNP

محمد، نظیفی فرد^{۱*}؛ محمدرضا، نعمت الهی^۲؛ علی، عرفانی نیا^۲

^۱ دانشگاه کاشان، پژوهشکده انرژی

^۲ دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی مکانیک، بخش مهندسی هسته ای

چکیده

در این مطالعه قسمتی از مجموعه میله های سوخت نیروگاه بوشهر به صورت عددی با استفاده از ابزار کد مونت کارلو و دینامیک سیالات محاسباتی به صورت توامان شبیه سازی شده است و پارامترهای ترموهیدرولیکی سیال خنک کننده نظیر ضریب انتقال حرارت متوسط سیال- سوخت در طول کانال و بردارهای سرعت سیال خنک کننده هنگام عبور از کانال با در نظر گرفتن اثر همسایگی کانالهای مجاور بدست آمده است. با شبیه سازی مونت کارلو قلب راکتور توسط کد MCNP توان تولیدی در میله های سوخت موجود در کانال مورد نظر محاسبه شده و با انجام کوپلینگ بین کدهای MCNP و ANSYS-CFX و رسیدن به همگرایی قابل قبول محاسبات ترموهیدرولیک انجام گرفته است.

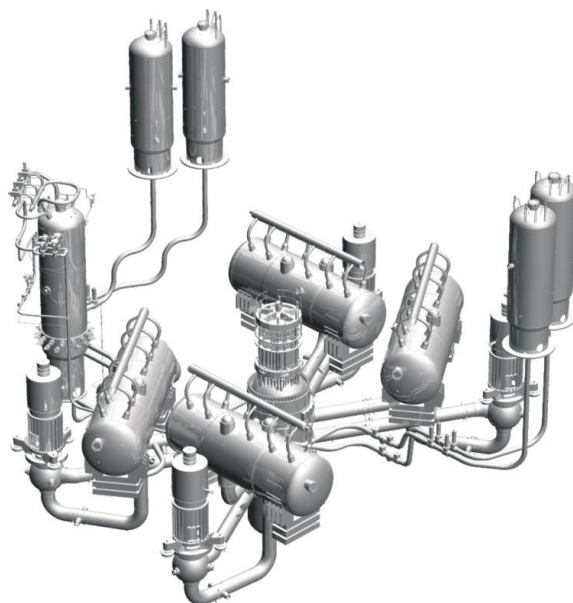
کلید واژه ها : دینامیک سیالات محاسباتی، راکتور آبی تحت فشار، مونت کارلو، تحلیل نوترونیک و

ترموهیدرولیک

۱. مقدمه

در راکتورهای آبی سیال کاری، نقش دوگانه ی خنک کننده و کند کننده را دارد. انتقال حرارت دائم از میله های سوخت راکتور هسته ای می بایست بگونه ای باشد که دمای سطح میله سوخت همواره در محدوده ایمن قرار گیرد. یکی از مهمترین چالشهای طراحی راکتورها از نقطه نظرایمنی و کارکرد ایمن آنها، شناخت صحیح رفتار ترموهیدرولیکی سیال در عبور از دسته میله های سوخت می باشد. بررسی پارامترهای ترموهیدرولیکی از قبیل دمای سیال در نقاط مختلف کانال سوخت، سرعت و نحوه توزیع سرعت در کانال، افت فشار و محاسبه توان مورد نیاز پمپ جهت به گردش در آوردن سیال خنک کننده نقش کلیدی در طراحی یک مجموعه سوخت با کارایی حرارتی بالا دارد. لذا بدون داشتن اطلاعات جامع در این زمینه، توانایی راکتور در انتقال حرارت ایمن به صورت بایسته و شایسته قابل پیش بینی نخواهند بود و نیز حاشیه های ایمنی راکتور مجهول خواهند ماند. تاکنون روشهای متفاوتی برای تحلیل رفتار ترموهیدرولیکی سیال خنک کننده حین عبور از مجموعه سوخت هسته ای بکار گرفته شده است که می توان به روشهای تحلیلی، تجربی و روشهای عددی اشاره کرد [۱-۴]. در اغلب موارد ترکیب روشهای عددی و تجربی با یکدیگر اطلاعات بسیار مهمی به طراحان و شرکتهای

سازنده مجموعه میله های سوخت می دهد. با توجه به رشد گسترده کدهای محاسباتی هسته ای و همچنین پیشرفتهای اخیر در زمینه قدرت محاسباتی کامپیوترهای، روشهای تحلیلی مبتنی بر محاسبه عددی مورد علاقه مهندسان و طراحان سوخت های هسته ای قرار گرفته است. در این تحقیق ساختار جریان سیال و مشخصه های انتقال حرارت مجموعه سوخت نیروگاه بوشهر که از نوع $VVER-1000$ می باشد مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین با شبیه سازی مونت کارلو قلب راکتور توسط کد $MCNP$ و انجام محاسبات نوترونیک، توان تولیدی در میله های سوخت موجود در کانال مورد نظر محاسبه شده است.

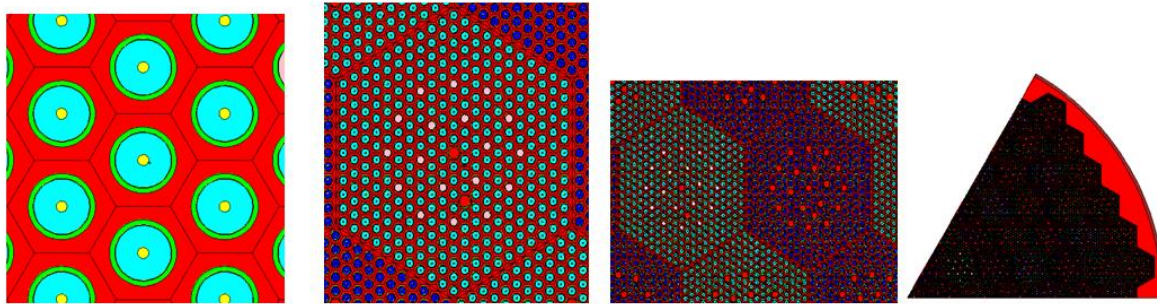


شکل ۱- طرحواره مدار حرارتی یک راکتور آبی تحت فشار

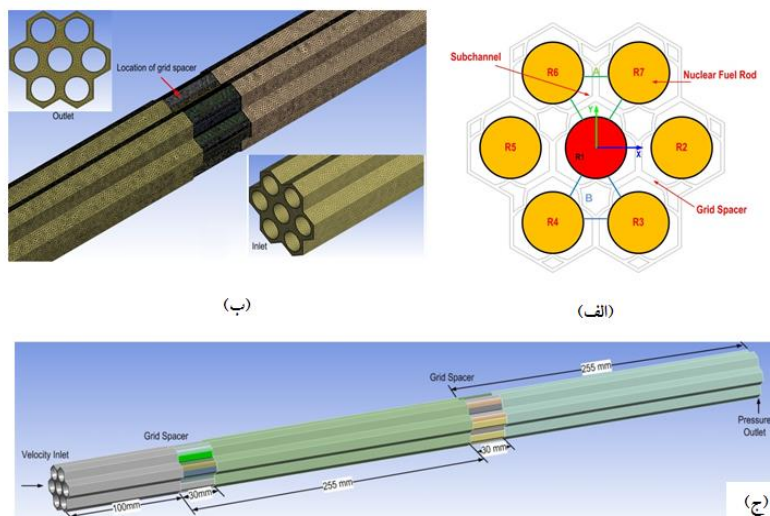
۲. شبیه سازی نوترونیک ترموهیدرولیک

به منظور شبیه سازی توان نوترونیک - ترموهیدرولیک مجموعه سوخت نیروگاه بوشهر، دامنه محاسباتی و پارامترهای مدل سازی نظیر هندسه و چینش مجتمع های سوخت و درصد غنای میله های سوخت و همچنین شرایط مرزی با توجه به اطلاعات ارائه شده در $PSAR$ نیروگاه اتمی بوشهر انتخاب شده است. ابتدا یک ششم قلب راکتور توسط کد $MCNP$ مدل سازی شد (شکل ۲). سپس تحلیل ترموهیدرولیکی مطابق دامنه محاسباتی نمایش داده شده در شکل ۳ انجام گرفت. قطر میله های سوخت $9/1$ میلیمتر و فاصله مرکز تا مرکز میله های سوخت برابر $12/3$ میلیمتر می باشد. همچنین ضخامت شبکه نگهدارنده سوخت با توجه به ابعاد مدل واقعی معادل $0/5$ میلی متر در نظر شده است. آب تحت فشار $15/5$ مگا پاسکال به عنوان سیال خنک کننده، حرارت ایجاد شده در میله های سوخت را جذب می کند. رژیم جریان کاملاً آشفته است و با توجه به تقارن فیزیکی موجود در محل قرارگیری میله های سوخت، هفت میله سوخت مدل سازی شده است. در ورودی دامنه

محاسباتی، سرعت سیال خنک کننده مقدار ثابت معادل ۵/۶ متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است و در مرز خروجی گرادیان کلیه متغیرها نسبت به راستای میله های سوخت صفر می باشد. در مرز میله ها قانون دیواره برقرار شده است. تعداد نقاط شبکه نهایی برای به منظور مستقل بودن جواب از شبکه در معادل ۲/۳ میلیون گره است. شکل ۳ فلوجارت محاسبات *MCNP* و *ANSYS* را نمایش میدهد. با انجام محاسبات نوترونیک توسط کد *MCNP* و استفاده از تالی های مناسب (تالی F_6) و انجام محاسبات، مقدار گرمای تولیدی در هر میله سوخت محاسبه شد. با استفاده از مقدار بدست آمده شار گرمایی در سطح میله سوخت، برای هر هفت میله سوخت محاسبه شده و به عنوان شرط مرزی گرمایی به نرم افزار *CFX* وارد شد. بعد از انجام محاسبات مقدار دما در سطوح مختلف کانال بدست آمد و با استفاده از دماهای بدست آمده برای سوخت و سیال خنک کننده، چگالی ها و سطوح مقاطع نوترونی متناظر با این دماها محاسبه شد و به عنوان ورودی کد *MCNP* وارد محاسبات نوترونیک گردید. این روند تا آنجا ادامه یافت که یک همگرایی در دماها و چگالی ها حاصل شد.

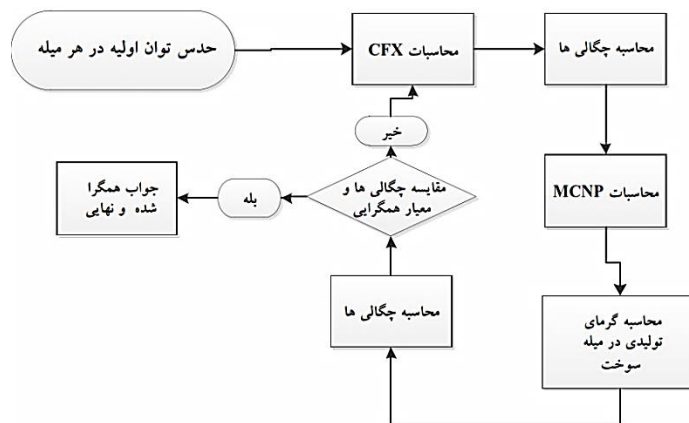


شکل ۲. شبیه سازی توسط کد *MCNP*. الف: یک ششم قلب. ب: مجتمع های سوخت. ج: یک مجتمع سوخت. د: یک کانال مجتمع سوخت حاوی هفت میله سوخت مورد مطالعه.





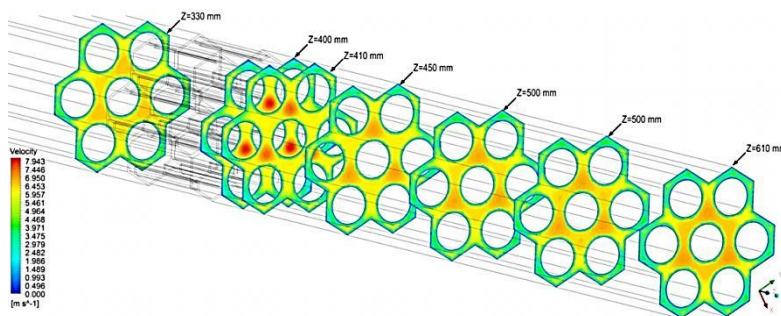
شکل ۳. شبیه سازی کانال جریان با هفت میله سوخت. الف: مقطع کانال همراه با اسپیسر گرید. ب: مش بندی هندسه شبیه سازی شده. ج: طول مورد مطالعه همراه با دو اسپیسر گرید در نظر گرفته شده.



شکل ۴. فلوچارت محاسبات ANSYS و MCNP

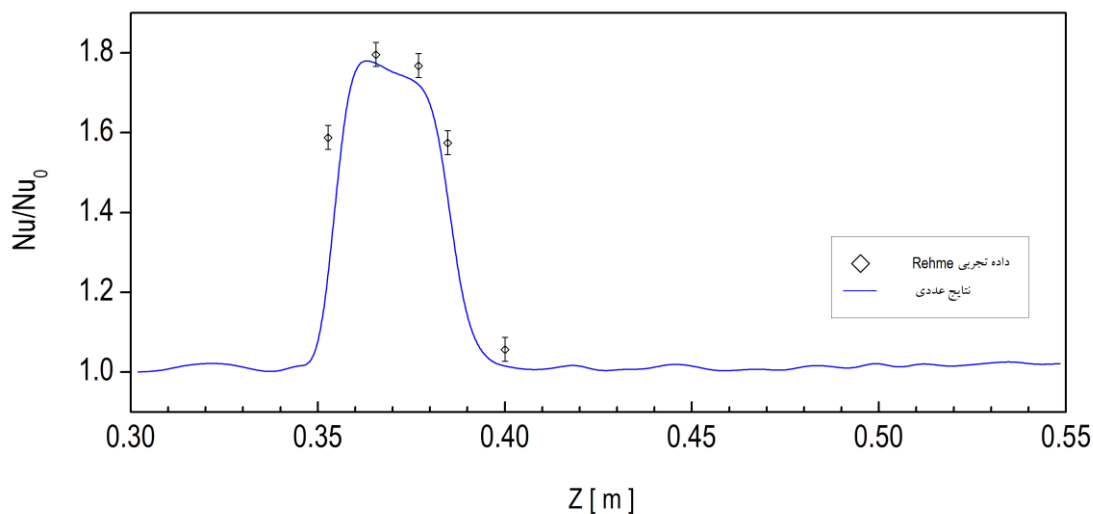
۴. نتایج

شکل ۵ کانتور تغییرات سرعت را در چندین سطح مقطع در بالادست و پایین دست اسپیسر گرید دوم نشان می دهد. مشاهده می شود که سرعت با گذر از اسپیسر گرید تغییر می کند. سرعت بعد از ورود به اسپیسر گرید سریعاً افزایش می یابد و در وسط اسپیسر گرید به مقدار ماکزیمم خود می رسد و سپس به سرعت افت می کند. یک روند افزایشی در سرعت سیال خنک کننده هنگام عبور از اسپیسر گرید مشاهده می گردد.



شکل ۵. کانتور تغییرات سرعت جریان در چندین مقطع جریان در بالا دست و پایین دست اسپیسر گرید دوم.

در شکل ۶ تغییرات نسبت (Nu/Nu_0) ، که Nu عدد نوسلت جریان بالادست و بعد از اسپیسر گرید می باشد، را در طول اسپیسر گرید دوم نشان می دهد. این نتایج با نتایج بدست آمده توسط $Rehme$ [۶]، مطابقت قابل قبولی دارد.



شکل ۶. تغییرات نسبت (Nu/Nu_0) ، در طول اسپیسر گرید دوم.

بحث و نتیجه گیری

نتایج تحلیل سه بعدی جریان سیال در قلب راکتور نیروگاه بوشهر نشان می دهد، سرعت سیال در محل نگهدارنده های سوخت افزایش می یابد که این مساله باعث افزایش افت فشار و افزایش ضریب انتقال حرارت موضعی می گردد. جریان عرضی و چرخشی در این مقاطع مشاهده می گردد که متاثر از وجود شبکه نگهدارنده میله سوخت می باشد و منجر به افزایش آشفتگی سیال خنک کننده در طول کانال می گردد. با اینحال جریانهای عرضی با افزایش فاصله از شبکه نگهدارنده کاهش می یابد. بیشترین مقدار ضریب انتقال حرارت موضعی در محل نگهدارنده های میله سوخت اتفاق می افتد. عدد بی بعد نسبی نوسلت در محل نگهدارنده های میله سوخت افزایشی به صورت متوسط در حدود $1/7$ برابری نسبت به مقدار آن در انتهای اسپین میله های سوخت دارد.

سپاسگذاری

نویسندگان از حمایت های پژوهشکده انرژی دانشگاه کاشان در حمایت از این تحقیق تشکر و قدردانی می نمایند.



مراجع

- [۱] Liu CC, Ferng YM (۲۰۱۰). Numerically simulating the thermal-hydraulic characteristics within the fuel rod bundle using CFD methodology. *Nucl. Eng. Des.* ۲۴۰(۱۰): ۳۰۷۸-۳۰۸۶.
- [۲] Song KN, Lee SB, Lee SH (۲۰۰۷). Performance evaluation of new spacer grid shapes for PWRs. *Nucl. Eng. Technol.* ۳۹(۶): ۷۳۷-۳۴۷.
- [۳] In WK, Chun TH, Shin CH, Oh DS (۲۰۰۸). Numerical computation of heat transfer enhancement of a PWR rod bundle with mixing vane spacers. *Nucl. Technol.* ۱۶۱: ۶۹-۷۹.
- [۴] Tóth S, Aszódi A (۲۰۱۰). CFD study on coolant mixing in VVER-۴۴۰ fuel rod bundles and fuel assembly heads. *Nucl. Eng. Des.* ۲۴۰(۹): ۲۱۹۴-۲۲۰۵.
- [۵] AEOI (2003). Busheher nuclear power plant preliminary safety analysis report. Iran: Atomic Energy Organization of Iran (AEOI).
- [۶] Rehme K (۱۹۷۳). Pressure drop correlations for fuel element spacers. *Nucl. Technol.* ۱۷: ۱۵-۲۳.