



## تحلیل ترموهیدرولیک گرم‌ترین مجتمع سوخت قلب راکتور VVER-1000 با استفاده از طراحی برنامه 3DTH مبتنی بر شبکه‌بندی بی‌سازمان

زارع گنجارودی، سعید\* - ره گشای، محمد

دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی هسته‌ای

### چکیده:

با توجه به هندسه پیچیده، طبیعت غیرخطی معادلات و همبسته‌سازی معادلات بقا، در این مقاله برای اولین بار، جهت تحلیل ترموهیدرولیک قلب راکتور، برنامه 3DTH، مبتنی بر شبکه‌بندی بی‌سازمان بر پایه مثلث‌بندی دلانی، طراحی شده است. با توجه به مزایای زیاد برنامه، اعم از هوشمندی الگوریتم، استفاده از شبکه‌بندی بی‌سازمان در نامگذاری و دقت بالای روش تحلیل، در این مقاله، گرم‌ترین مجتمع سوخت قلب راکتور VVER-1000، مدل‌سازی شده و نتایج، اعم از دمای خنک‌کننده و سوخت، ضریب انتقال حرارت، محاسبات انبساط حرارتی سوخت و غلاف و تشخیص گرم‌ترین نقاط استخراج شده، با FSAR مطابقت داده شده تا دقت و ارزش استفاده از برنامه 3DTH مشخص شود.

کلمات کلیدی: VVER-1000، 3DTH، FSAR

### مقدمه:

قلب یک راکتور هسته‌ای آب تحت فشار، به گونه‌ای طراحی می‌شود که برداشت حرارت با حاشیه ایمنی بالا صورت گرفته و از دوفازی شدن جریان و ایجاد جریان ناپایدار جلوگیری شود. به دلیل اهمیت شرایط میله سوخت و شرایط جریان و همچنین به دلیل پیچیدگی مدل‌سازی جریان دوفازی، مناسب‌ترین روش انجام محاسبات روش زیرکانال جریان است. در این روش، مسیر جریان سیال به زیرکانال‌های مختلف تقسیم‌بندی شده و معادلات بقای جرم، انرژی و مومنتوم و روابط تجربی جریان‌های دوفازی و تکفازی، برای هر زیرکانال نوشته شده و حل می‌شوند. بدین ترتیب تبادل جرم، انرژی و مومنتوم بین زیرکانال‌های جریان در نظر گرفته می‌شود. با توجه به هندسه پیچیده و تعدد پارامترها و طبیعت غیرخطی معادلات، حل تحلیلی و همبسته‌سازی معادلات بقا و معادلات کمکی امکان‌پذیر نبوده و ناگزیر به استفاده از روش‌های حل عددی می‌باشیم. این معادلات و حل عددی آنها در کدهای معتبر مانند COBRA-EN موجود می‌باشد [۱،۶].

با توجه به اهمیت و دقت در نامگذاری میله‌های سوخت، مشخص کردن زیرکانال‌های مجاور با آن و نیز ارتباط زیرکانال‌ها با یکدیگر و همچنین بررسی اثر آنها در حل معادلات جرم، مومنتوم و انرژی، در این برنامه از روش ابتکاری شبکه بی‌سازمان که یکی از روش‌های بسیار مهم تولید شبکه در دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) می‌باشد، استفاده

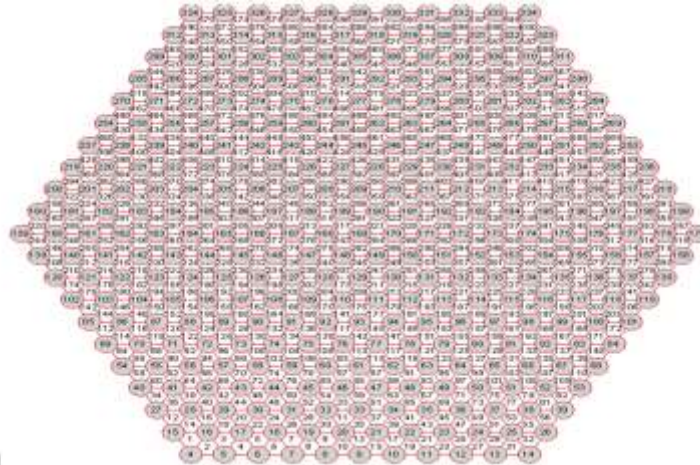


شده است. از مزایای این روش می توان به مواردی همچون هوشمندی الگوریتم و خودکار بودن شماره گذاری میله های سوخت و زیرکانالها، سرعت بسیار بالای روش، حذف اشتباهات متداول در شماره گذاری، ارتباط بین میله های سوخت و زیرکانالها و ارتباط بین زیرکانالهای مجاور و همچنین فراگیر بودن این روش برای انواع مجتمعات سوخت در راکتورهای آب سبک تحت فشار اشاره کرد [۱،۲،۳].

برنامه 3DTH، یک برنامه ترموهیدرولیکی کامل برای مدلسازی و محاسبات رفتار ترموهیدرولیکی راکتور می باشد که معادلات بقا برای جریان سیال و نیز معادلات حاکم در سوخت و غلاف سوخت را به روش تفاضل محدود حل می کند. برنامه 3DTH دارای مزایای بسیار زیاد و قابل توجهی نسبت به دیگر برنامه ها و کدهای محاسباتی از این دست می باشد که می توان به برخی از این موارد همچون در نظر گرفتن میزان اثر انبساط حرارتی در سوخت و غلاف، اثر Burn Up بر روی ضریب هدایت حرارتی در سوخت، دارا بودن انواع مدل های تحلیل گپ بین سوخت و غلاف سوخت نظیر مدل Calza-Bini و مدل گپ ارائه شده در کد Relap5، انواع روابط تصحیح و به روز شده شار حرارتی بحرانی (CHF)، اثر Porosity سوخت بر روی ضریب هدایت حرارتی آن و همچنین در نظر گرفتن تعداد بینهایت برای انواع المنت های راکتور اعم از میله های سوخت و یا مجتمعات را نام برد. این تحقیق در راستای فعالیتهای تحقیقاتی سازمان انرژی اتمی ایران می باشد.

### روش کار:

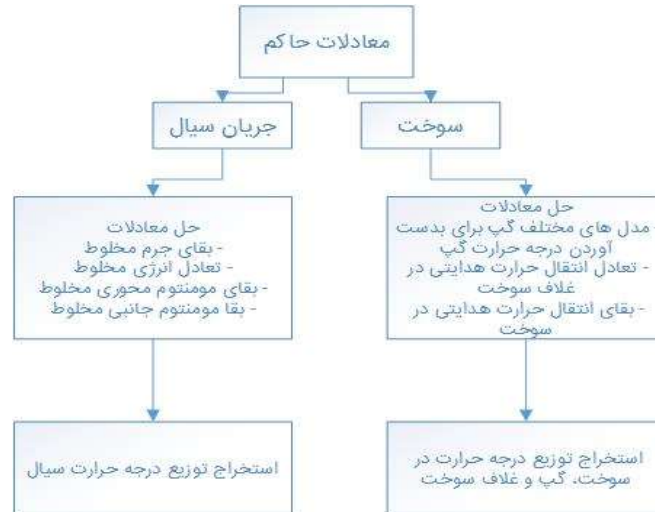
با توجه به برنامه نوشته شده 3DTH، در شبکه بندی بی سازمان با استفاده از مثلث بندی دلانی، توزیع نقاط ممکن است به صورت دستی و یا از روش های خودکار انجام شود. با پایان یافتن تولید نقاط و مثلث بندی بین نقاط، شبکه نهایی تولید شده در واقع بیانگر همان وضعیت زیرکانال های هر مجتمع سوخت می باشد. به طور کلی فرآیند شماره گذاری زیرکانالها در این شبکه بندی به ترتیب، تولید نقاط (تعیین مکان و شماره میله های سوخت)، تشکیل ابرمثلث، انجام فرآیند مثلث بندی دلانی، حذف مثلث های خارج از مرز خارجی و سازمان دهی اطلاعات هر میله سوخت می باشد. بنابراین در شبکه بندی بی سازمان بر پایه مثلث بندی دلانی، برخلاف دیگر کدهای شبیه ساز رفتار ترموهیدرولیک، شماره گذاری میله های سوخت، زیرکانال های عبوری سیال و ارتباط بین آنها به صورت اتوماتیک انجام می شود.



شکل (۱): نمایی از نامگذاری زیرکانال‌ها و میله‌ها در مجتمع سوخت

به طور کلی برنامه نوشته شده 3DTH از یک برنامه اصلی و چندین زیربرنامه شامل زیربرنامه input data برای نحوه چیدمان میله‌های سوخت، اطلاعات سوخت، ضرایب معادلات حل شده و همچنین شرایط مرزی، زیربرنامه Enthalpy برای حل معادله انتالپی سیال، زیربرنامه‌های Lateral and Axial Momentum برای انجام محاسبات مومنتوم عرضی و محوری، زیربرنامه Pressure Gradient برای حل معادلات گرادیان فشار و استخراج اطلاعات، زیربرنامه Update Data برای پارامترهای ترموفیزیکی و چک نهایی اطلاعات ورودی، زیربرنامه Vapor Continuity به منظور حل معادله Void Fraction مربوط به سیال جهت محاسبه پارامتر کسر خلا، زیربرنامه Convergency Condition به منظور حل معادله پیوستگی جرم بخار و بررسی شرایط همگرایی محاسبات، زیربرنامه Rod-Heat Transfer برای حل معادلات سوخت، غلاف و گپ در نواحی مختلف و ورود پارامترهای سوخت به صورت تابعی از دما جهت محاسبه دمای محوری و شعاعی میله سوخت، زیربرنامه Enthalpy-Gap برای محاسبات ضریب انتقال حرارتی گپ با استفاده از تحلیل به روش‌های موجود در برنامه و در نهایت زیربرنامه Result جهت استخراج اطلاعات مربوط از حل و همبسته‌سازی معادلات مختلف تشکیل شده است.

برنامه 3DTH، معادلات حاکم بر جریان سیال و نیز معادلات حاکم در سوخت، غلاف و گپ را به روش تفاضل محدود حل می‌کند. به طور کلی این برنامه از دو قسمت تشکیل هندسه و شماره‌گذاری میله‌های سوخت و زیرکانالها و همچنین حل معادلات هیدرودینامیکی در هر زیرکانال و نیز حل معادلات سوخت، غلاف و گپ می‌باشد. در ادامه فلوچارت مربوط به نحوه کارکرد این برنامه در مدلسازی و انجام محاسبات پارامترهای ترموهیدرولیک آورده شده است.



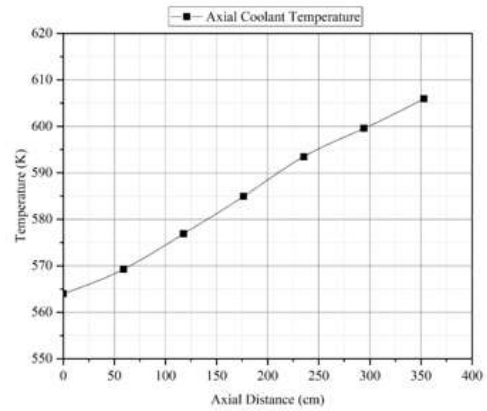
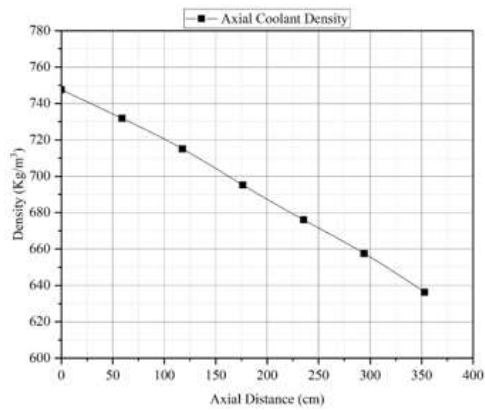
شکل (۲): فلوجارت کارکرد روش زیرکانال در سوخت و خنک کننده در سیال تکفاز در برنامه 3DTH [۱]

در این مقاله، مدلسازی رفتار ترموهیدرولیک راکتور VVER-1000 با برنامه 3DTH انجام شده است. توان تصحیح شده (حاصل کوپلینگ کدهای WIMS & CITATION و COBRA-EN) به عنوان ورودی به صورت توان خطی به برنامه داده شد و مدلسازی هندسه و پارامترهای ترموهیدرولیک تکمیل و پارامترهای موردنظر برای یک کانال (ترجیحاً گرم‌ترین کانال) و یک میله سوخت (ترجیحاً گرم‌ترین میله سوخت) استخراج گردید. در نهایت اطلاعات استخراج شده از برنامه با FSAR راکتور مقایسه و مطابقت داده شد تا دقت محاسبات و اهمیت طراحی برنامه 3DTH با مشخصات و مزایا شرح داده شده، مشخص گردد.

### نتایج:

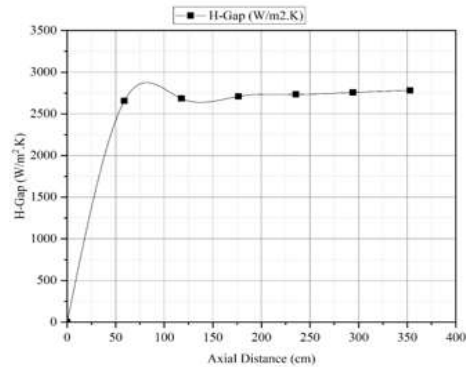
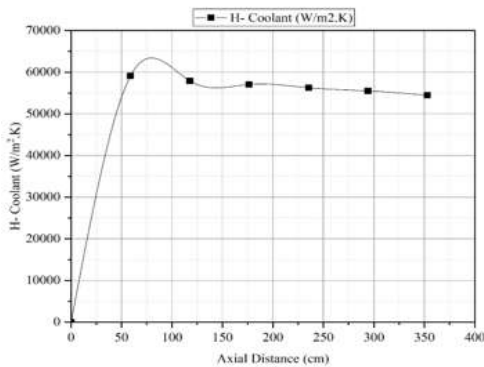
با توجه به مش بندی محوری انجام شده در گرم‌ترین مجتمع سوخت قلب راکتور VVER-1000، دمای خنک‌کننده در این مجتمع از حدود ۲۹۱ درجه سانتی‌گراد در ورود تا حدود ۳۳۲ درجه سانتی‌گراد در خروج می‌باشد که این مقدار، با دقت بالا با مقادیر موجود در گزارشات موجود مطابقت دارد [۴،۷].

همچنین، برنامه 3DTH قادر است که میانگین هر پارامتر محاسبه شده را در مش بندی‌های انجام شده، محاسبه نماید. با توجه به این مزیت برنامه، میانگین دما و چگالی خنک‌کننده در گرم‌ترین کانال در گرم‌ترین مجتمع به ترتیب دارای مقادیر ۵۸۶/۰۱۱ درجه کلونین و ۶۹۳/۳۸۵ کیلوگرم بر سانتی‌مترمکعب می‌باشد.



شکل (۳): تغییرات دما و چگالی محوری خنک‌کننده در گرم‌ترین مجتمع سوخت قلب راکتور

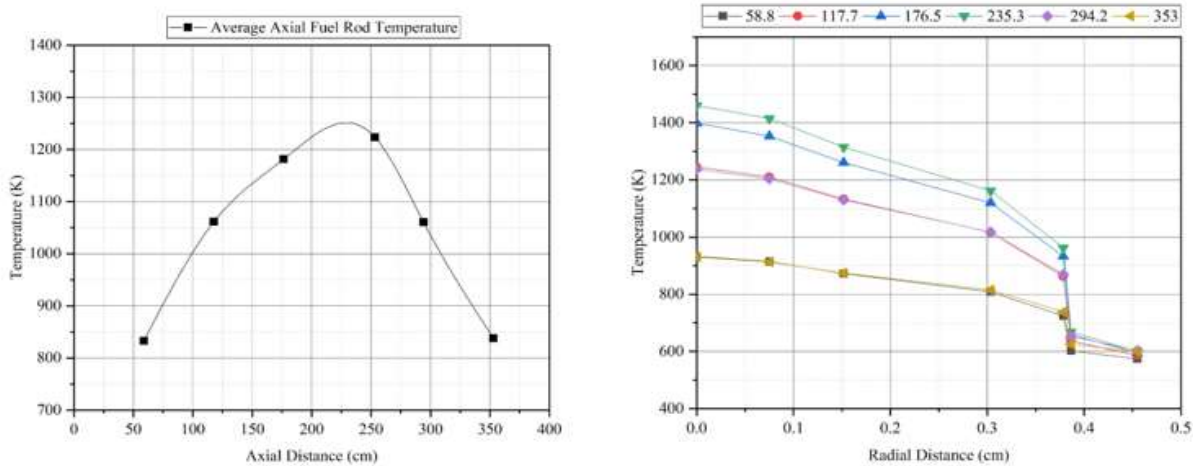
شکل (۴)، نمودار تغییرات ضریب انتقال حرارت محوری خنک‌کننده و گپ در گرم‌ترین مجتمع سوخت قلب راکتور را نشان می‌دهد.



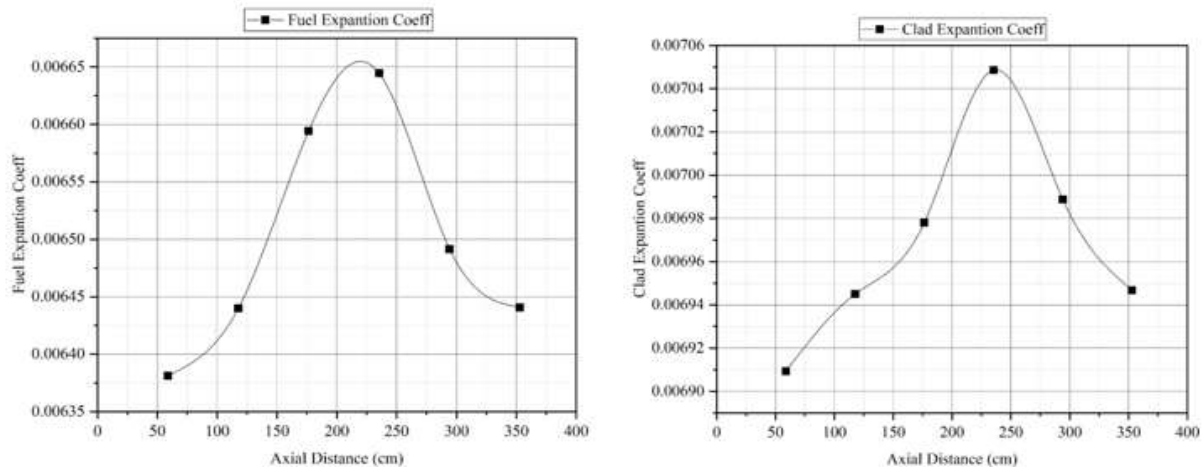
شکل (۴): تغییرات ضریب انتقال حرارت محوری خنک‌کننده و گپ در گرم‌ترین مجتمع سوخت

از مزایای این برنامه، محاسبه تغییرات ضریب انتقال حرارت گپ در مش‌های مختلف می‌باشد. زیرا دیگر کدهای شبیه‌ساز نظیر کد COBRA-EN این مقدار را در ورود و خروج ثابت در نظر می‌گیرند.

شکل (۵)، تغییرات دمای سوخت در راستای شعاعی و همچنین میانگین دمای سوخت در موقعیت‌های محوری مختلف را نشان می‌دهد.



شکل (۵): تغییرات دمای میله سوخت در راستای شعاعی در گرم‌ترین مجتمع سوخت قلب راکتور با توجه به محاسبات دمایی میله سوخت در گرم‌ترین مجتمع سوخت قلب، بیشینه دمای سوخت در مش چهارم محوری به مقدار نزدیک به ۱۴۸۰ درجه کلوین می‌رسد که این مقدار، یا مقادیر موجود در گزارشات راکتور مطابقت دارد [۷].  
شکل (۶)، تغییرات ضریب انبساط حرارتی سوخت و غلاف در گرم‌ترین مجتمع سوخت را نشان می‌دهد.



شکل (۶): تغییرات ضریب انبساط حرارتی سوخت و غلاف در گرم‌ترین مجتمع سوخت قلب راکتور



از دیگر مزایای برنامه 3DTH، محاسبات مربوط به ضریب انبساط و انقباض حرارتی سوخت و غلاف می‌باشد. این برنامه قادر است تا محاسبات مربوط به ضرایب انبساط را در فشار کاری و دمای موجود سوخت و غلاف محاسبه نماید و همچنین تغییر ضخامت‌های موجود را بدست آورد. این در حالیست که دیگر کدهای هسته‌ای تحلیل رفتار ترموهیدرولیک نمی‌توانند این پارامترها را محاسبه کنند و مجبور بوده این پارامترها را ثابت در نظر بگیرند که این مورد می‌تواند خطای موجود در محاسبات را افزایش دهد.

### نتیجه‌گیری:

برنامه طراحی شده 3DTH، یک برنامه ترموهیدرولیکی کامل و با دقت بالا بوده که معادلات بقا برای جریان سیال و نیز معادلات حاکم در سوخت و غلاف سوخت را به روش تفاضل محدود حل می‌کند. برنامه 3DTH دارای مزایای بسیار اعم از در نظر گرفتن میزان انبساط حرارتی در سوخت و غلاف، اثر Burn Up بر ضریب هدایت حرارتی در سوخت، دارا بودن انواع مدل‌های تحلیل گپ بین سوخت و غلاف سوخت نظیر مدل Calza-Bini و مدل گپ ارائه شده در کد Relap5، انواع روابط تصحیح و به‌روز شده شار حرارتی بحرانی، اثر Porosity سوخت بر روی ضریب هدایت حرارتی آن و ... می‌باشد. در این مقاله، گرم‌ترین مجتمع سوخت قلب راکتور VVER-1000 مدل‌سازی شده و پارامترهای ترموهیدرولیکی استخراج گردید. با توجه به محاسبات، دمای خنک‌کننده در این مجتمع از حدود ۲۹۱ درجه سانتی‌گراد در ورود تا حدود ۳۳۲ درجه سانتی‌گراد در خروج می‌باشد. همچنین بیشینه ضریب انتقال حرارت خنک‌کننده و گپ به ترتیب حدود ۶۰۰۰۰ و ۲۷۰۰ وات بر مترمربع درجه کلوین می‌باشد. بیشینه دمای سوخت در این مجتمع به حدود ۱۴۸۰ درجه کلوین در مرکز می‌رسد که در مش چهارم و در ارتفاع حدود ۲۲۰ سانتی‌متری اتفاق می‌افتد.

### مراجع:

[۱] دایره‌المعارف مباحث پیشرفته در انتقال حرارت هسته‌ای، ۱۳۹۵، محمد ره‌گشای، انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکزی، جلد ۲، فصل ۵.

[۲] اصول و مفاهیم اولیه در انتقال حرارت هسته‌ای، ۱۳۹۲، محمد ره‌گشای، انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات تهران.

[3] de Berg, Mark; Otfried Cheong; Marc van Kreveld; Mark Overmars 2008, Delaunay Triangulations, chapter 9, [ISBN 978-3-540-77973-5](https://doi.org/10.1007/978-3-540-77973-5).

[4] Bushehr Nuclear Power Plant, Final Safety Analysis Report (FSAR), 2003, Technical Report, Chapter 4.

[5] Preliminary Safety Analysis Report, (PSAR) of Nuclear Power Plant, 1976, Iran 1 and 2, Vol. 1 and 2, KWU.



بیست و ششمین کنفرانس هسته‌ای ایران

۸۰۷ اسنما ۱۳۹۸- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تهران



- 
- [6] ENEL SpA, Milano, 2001, COBRA-EN Manual: Code System for Thermal-Hydraulic Transient Analysis of Light Water Reactor Fuel Assemblies and Cores, OAKRIDGE national laboratory.
- [7] Bushehr Nuclear Power Plant, Final Safety Analysis Report (FSAR), 2003, Technical Report, Chapter 15.