

مطالعه‌ی واکنش مجتمع‌های سوخت قلب رآکتور VVER-۱۰۰۰ به تغییرات شار جرمی ناشی از حادثه‌ی از دست رفتن خنک‌کننده با استفاده از اثر صوت

سروش حیدری سنگستانی^۱، محمد رهگشای*^۱، ناصر وثوقی^۲، میترا اطهری علاف^۱

۱. گروه مهندسی هسته‌ای، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، صندوق پستی: ۷۷۵-۱۴۵۱۵، تهران - ایران
 ۲. دانشکده‌ی مهندسی، دانشکده‌ی مهندسی انرژی، دانشگاه صنعتی شریف، صندوق پستی: ۸۶۳۹-۱۱۳۶۵، تهران - ایران

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۴/۱۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۳/۱

چکیده: هدف این مطالعه، شبیه‌سازی گرمایی واکنش مجتمع‌های سوخت قلب رآکتور VVER-۱۰۰۰ به تغییرات شار جرمی ناشی از حادثه‌ی از دست رفتن خنک‌کننده و افت فشار ناگهانی آن است. تحلیل این حادثه در بازه‌ی زمانی بسیار کوتاه - در ابعاد میلی‌ثانیه - با استفاده از اثر صوت صورت گرفته است. معادلات گرمایی وابسته به زمان با استفاده از روش سیال تراکم‌پذیر در تک کانال گرم‌شونده تحلیل و با نتیجه‌های حاصل از گذره‌ی مورد نظر در یک رآکتور PWR اعتبارسنجی شده است. برای مقایسه، گذره‌ی مورد نظر در کد RELAP5 نیز شبیه‌سازی شد و نتایج مورد مقایسه قرار گرفتند. سپس، با توجه به تقارن یک ششم قلب رآکتور VVER-۱۰۰۰ تعداد ۲۸ مجتمع سوخت با توجه به ویژگی‌های منحصر به فرد هر مجتمع بررسی شد. افت شار جرمی پس از چند میلی‌ثانیه در انتهای کانال احساس شد. مشاهده شد که افت شار جرمی به مقدار سهم هر مجتمع در تولید توان گرمایی قلب وابسته است. استفاده از اثر صوت منجر به شناسایی تفاوت در تغییرات شار جرمی ناشی از افت فشار ناگهانی، با توجه به ویژگی هر مجتمع سوخت خواهد شد.

کلیدواژه‌ها: مجتمع سوخت، VVER-1000، شار جرمی، اثر صوت

Study of the VVER1000 reactor core fuel assemblies reaction to mass flux changes, caused by lose of coolant accident, by means of the sound effect

S. Heidari¹, M. Rahgoshay*¹, N. Vosoughi², M. Athari¹

1. Department of Nuclear Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, P.O.Box: 14515-775, Tehran-Iran
 2. Department of Engineering, Department of Energy Engineering, Sharif University of Technology, P.O.Box: 11365-8639, Tehran -Iran

Abstract: The article aims in the studying of thermal-hydraulic simulation of the VVER-1000 reactor core fuel assemblies' reaction to the mass flux changes which are caused by the lose of coolant accident and its sudden pressure drop. The analysis of mentioned accident is performed in concise periods (mili second) by the use of the sound effect. Time-related thermal-hydraulic equations were analyzed by the method of a compressible fluid in a single heated channel and were evaluated by the results of the mentioned transient, in a PWR reactor. The mentioned transient was simulated in RELAP5 code and results were compared to the previous ones. Then, 28 reactor fuel assemblies were studied, considering the 1/6 symmetry of VVER-1000 reactor and unique features of every assembly. Mass flux drop was happened the end of the channel, after a few seconds. It was observed that mass flux is at dependent on the role of every assembly in the production of core heat power. The acoustic effect reveals some of the perturbations in mass flux changes, considering every fuel assembly features.

Keywords: Fuel assembly, VVER-1000, Mass flux, Sound effect

*Email: rahgoshay.m3571@gmail.com

۱. مقدمه

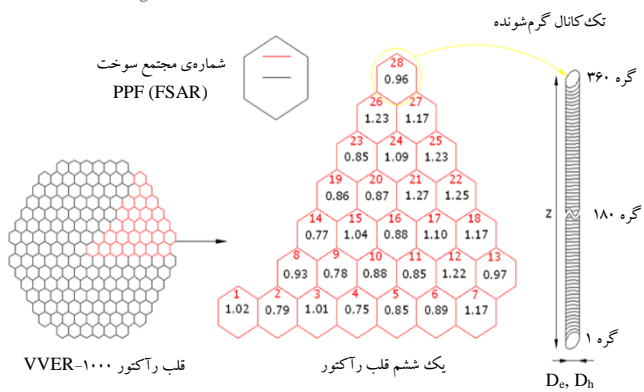
برای محاسبه‌های قلب رآکتور توسعه دادند [۷]. از پدیده‌ی آکوستیک برای تطبیق گام‌های کوچک مکانی و زمانی استفاده می‌شود. این تطبیق با معیار کورانت مشخص می‌شود [۸]:

$$\Delta t < \frac{\Delta z}{(c + V_m)} \quad (1)$$

که در آن Δt بازه‌ی گام زمانی، Δz ابعاد گام مکانی، c سرعت صوت و V_m سرعت متوسط سیال است. عطف به معیار اندازه‌ی مش، روش پخش موج فشار نیازمند محاسبه‌های طولانی برای پایداری عددی است. بنابراین از اثر آکوستیک به رغم دقت بالای آن معمولاً استفاده نمی‌شود، اگر چه، این اثر برای تغییرات شدید پارامترها بسیار مفید به نظر می‌رسد. گذره‌ی مورد نظر نوعی از حادثه‌ی از دست رفتن خنک‌کننده (LOCA) است که به عنوان شکست گیوتینی مدار اول شناخته می‌شود. وقتی این حادثه رخ می‌دهد (شکست شاخه سرد در ورودی قلب) آهنگ جریان آب خروجی دچار شکست ناگهانی برابر با 45000 kg s^{-1} می‌شود [۹]. یک موج فشار ایجاد و در سرتاسر کانال پخش می‌شود. در کار حاضر برنامه‌ای محاسباتی برای بررسی افت فشار شدید خنک‌کننده‌ی قلب رآکتور VVER-1000 با استفاده از روش تک کانال گرم‌شونده^۲ (SHC)، سیال متراکم بخش‌بندی شده^۳ (SC)، و پدیده‌ی آکوستیک توسعه داده شده است. روش SHC از چهار رویکرد مختلف برای تحلیل جریان استفاده می‌کند، که شامل مدل‌های SC، MI^۴، SV و CI است. مدل‌های MI و CI فقط اثر انبساط گرمایی بر روی چگالی را در نظر می‌گیرند و برای تحلیل جریان در حالت‌های گذرای سریع به کار برده می‌شوند. مدل SC علاوه بر اثر انبساط گرمایی، اثر صوت (تأثیر فشار بر چگالی) را نیز در نظر می‌گیرد و برای حالت‌های گذرای بسیار سریع استفاده می‌شود. در چنین شرایطی

برای شبیه‌سازی گذره‌های گرمایی، از مدل‌ها و کدهای گوناگونی، که درجه‌ی متفاوتی از درستی و دقت را ارائه می‌دهند، استفاده می‌شود. بسیاری از آن‌ها قادر به تحلیل شرایط گرمایی حالت‌های گذرای سریع، در زمان بسیار کوتاه نیستند. بنابراین، استفاده از روشی که قادر به تحلیل حالت‌های گذرای سریع، با درستی و دقت بسیار زیاد باشد، ضروری است. یکی از راه‌های مؤثر در تحلیل حالت‌های گذرای سریع استفاده از روش‌های موجی شکل یا آکوستیک است. در این زمینه مطالعاتی انجام شده است. چان (۱۹۹۱)، با استفاده از روش‌های موجی شکل نسبت به تجزیه و تحلیل محاسبه‌های وابسته به زمان اقدام کرده است [۱]. اوی و همکاران (۲۰۰۳)، انتقال حرارت در سیستم مکان/ زمان، با استفاده از ارزیابی موجی شکل را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از روش عناصر محدود، برای حل عددی بهره گرفتند [۲]. لیو و همکاران (۲۰۰۶)، بر روی شبیه‌سازی انتقال حرارت سریع با افزایش چگالی قدرت، برای محاسبه‌ی پاسخ پایدار مطالعه کردند. آن‌ها از موج‌های با طیف سریع در فضای بسامد استفاده کردند. کوتاه‌ترین مرتبه‌ی زمانی برای پارامترهای مطالعه شده ۱۵ میلی‌ثانیه بوده است [۳]. پروسکورا یا کو (۲۰۱۷)، بر روی اثر نوسان‌های آکوستیک در خنک‌کننده‌ی رآکتورهای هسته‌ای مانند VVER1000 پژوهش‌هایی انجام داده است [۴]. تدرآس و همکاران (۱۹۹۰)، نسبت به بسط و تحلیل روش‌های مبتنی بر آکوستیک اقدام کردند. هم‌چنین روش سیال تراکم‌پذیر تک کانال گرم‌شونده را به عنوان یکی از راه‌هایی که می‌توان از اثرهای پخش صوت و انبساط گرمایی به طور هم‌زمان استفاده کرد، مورد بررسی قرار دادند [۵]. کد کستانزا از روش تک کانال گرم‌شونده برای تحلیل دینامیک خنک‌کننده‌های مایع در رآکتورهای هسته‌ای استفاده می‌کند [۶]. هم‌چنین حسینی و همکاران (۲۰۱۵)، یک کد ترمونوترونیک با استفاده از مدل MI در تک کانال گرم‌شونده

1. Loss of coolant accident (LOCA)
2. Single heated channel (SHC)
3. Sectionalized compressible fluid (SC)
4. Momentum integral



شکل ۱. تبدیل هر مجتمع سوخت به یک تک کانال گرم‌شونده و نحوه‌ی مش‌بندی هندسه در راستای محور Z.

جدول ۱. شرایط بهره‌برداری و هندسه‌ی رآکتور VVER-۱۰۰۰ [۹]

شرایط بهره‌برداری	PWR
طول کانال (m)	۳.۶
قطر میله‌ی سوخت (mm)	۹.۱
فاصله‌ی مرکزی میله‌های سوخت (mm)	۱۲.۷۵
نوع قرص سوخت	UO ₂
تعداد میله‌های سوخت در مجتمع سوخت	۳۱۱
نرخ خطی گرما (W/cm)	۱۶۶.۷
نرخ جریان خنک‌کننده (m ³ /h)	۸۴۸۰۰
فشار ورودی (MPa)	۱۶
فشار خروجی (MPa)	۱۵.۷
دمای ورودی (°C)	۲۹۱

تقریب‌های مختلفی برای همبسته‌سازی معادله‌های انرژی و تکانه برای امکان‌سنجی حل گذره‌ی مورد نظر می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد. یکی از این تقریب‌ها استفاده از روش حل عددی ارایه شده توسط تدرآس [۵] است که می‌تواند برای تحلیل گذره‌ی افت فشار ناگهانی استفاده شود. بنابراین تغییرات عرضی پارامترها در کانال جریان نادیده گرفته شد. با این شرایط معادله‌های وابسته به پایستگی جرم، تکانه و انرژی با در نظر گرفتن گذره‌ی مورد نظر به صورت معادله‌های زیر استفاده شد:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial G_m}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial G_m}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{G_m^2}{\rho_m} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} - \frac{f G_m |G_m|}{r D_e \rho_m} - \rho_m g \quad (3)$$

$$\rho_m \frac{\partial h_m}{\partial t} + G_m \frac{\partial h_m}{\partial z} = \frac{q'' P_h}{A_z} + \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{G_m}{\rho_m} \left[\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{f G_m |G_m|}{2 D_e \rho_m} \right] \quad (4)$$

زمان و دقت محاسبه‌ها افزایش چشمگیری می‌یابد. این در حالی است که مدل SV هیچ کدام از این دو اثر را در محاسبه‌ها لحاظ نمی‌کند و برای شبیه‌سازی حالت‌های گذرای متوسط و کند قابلیت استفاده دارد. از آنجایی که گذره‌ی مورد بررسی به عنوان یک حالت گذرای بسیار سریع شناخته می‌شود، تنها مدلی که قادر به تحلیل چنین گذره‌ای در زمان‌های بسیار کوتاه باشد، مدلی است که بتواند علاوه بر اثر انبساط گرمایی، اثر صوت را نیز در نظر بگیرد. به همین منظور از روش SC برای محاسبه‌ها استفاده شده است. برای استفاده از روش ذکر شده، هر یک از ۲۸ مجتمع سوخت به عنوان یک تک کانال گرم‌شونده در نظر گرفته شده است. تغییر هر مجتمع سوخت به یک تک کانال گرم‌شونده و نحوه‌ی مش‌بندی هندسه در راستای محور Z در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲. روش کار

معادله‌های وابسته به پایستگی جرم، تکانه و انرژی با در نظر گرفتن گذره‌ی مورد نظر و استفاده از مش‌بندی محوری در محیط نرم‌افزار مطلب^۱ برنامه‌نویسی شدند. تک کانال گرم‌شونده، به عنوان یک زیرکانال خنک‌کننده، درون مجتمع سوخت در نظر گرفته شد، که تنها خنک‌کننده از پایین به بالا حرکت می‌کند. معادله‌های انتقال گذره در خنک‌کننده با ورود گرمای محوری از سطح غلاف حل شد. هر موقعیت محوری از سطح جریان به عنوان یک سطح کنترل به منظور حل معادله‌های محوری میانگین جریان خنک‌کننده در نظر گرفته شد. شرایط بهره‌برداری و هندسه‌ی رآکتور VVER-۱۰۰۰ در جدول ۱ نشان داده شده است. معادله‌های ذکر شده در حالت تک کانال گرم‌شونده و روش SC، برای هر یک از ۲۸ مجتمع سوخت حل شد. هم‌چنین برخی از ویژگی‌های ترمودینامیکی آب مورد استفاده قرار گرفت [۱۰].

1. MATLAB software

$$\frac{\rho_m}{c^r} \frac{\partial h_m}{\partial t} + \frac{\partial G_m}{\partial z} - \frac{R_p G_m}{\rho_m} \frac{\partial P}{\partial z} + R_p G_m \frac{\partial h_m}{\partial z} = R_p \left[\frac{q'' Ph}{A_z} + \frac{f G_m^r |G_m|}{r D_e \rho_m^r} \right] \quad (10)$$

در این جا سرعت صوت C به صورت زیر تعریف می شود:

$$c^r = \frac{\rho_m}{\rho_m R_p + R_h} \quad (11)$$

روش SC، با حل عددی معادله‌های تفاضل و با در نظر گرفتن h_m و P و G_m ، معادله‌های انتقال دیفرانسیلی را در نقاط متعدد، در طول کانال ارایه می دهد. در استفاده از این روش، سرعت صوت در محیط هندسه‌ی مورد بررسی، اهمیت ویژه‌ای دارد که منجر به در نظر گرفتن زمان عبور موج از محیط به عنوان یکی از شرایط مرزی می شود. هر کدام از ۲۸ مجتمع سوخت به صورت یک تک کانال در نظر گرفته شد. جمله‌ی بخش‌بندی شده با توجه به ارتفاع ۳٫۶ m کانال به تقسیم کانال به ۳۶۰ قسمت محوری برای اجرای حل عددی اشاره دارد. مقدار گام زمانی با در نظر گرفتن $\Delta z = 0.01$ cm برای پایداری عددی به همراه سرعت صوت در سیال (900 m s^{-1})، برابر با $10 \mu\text{s}$ به دست آمد. اما برای دقت بیش تر در کد توسعه داده شده SHC این مقدار $1 \mu\text{s}$ در نظر گرفته می شود. برای شبیه‌سازی با کد ریلپ-۵، قلب رآکتور به صورت کامل مدل شد. مجتمع سوخت داغ به صورت یک تک کانال و سایر مجتمع‌ها نیز به صورت یک کانال شبیه‌سازی شد. ارتفاع قلب به ۳۶ قسمت محوری تقسیم شد. با اعمال گام زمانی $10 \mu\text{s}$ و با در نظر گرفتن شرایط پایدار (مدت ۱۰۰ s) قبل از شبیه‌سازی، شرایط مرزی، برای شبیه‌سازی اعمال شد. در خروجی، داده‌های مربوط به شار جرمی برای هر حجم هیدرودینامیکی مورد بررسی قرار گرفت. به منظور دستیابی به جواب دقیق‌تر، ارتفاع قلب از ۱۲ تا ۳۶ قسمت و گام زمانی از $1 \mu\text{s}$ تا $10 \mu\text{s}$ مورد شبیه‌سازی قرار گرفت. انحراف محسوسی در جواب‌ها مشاهده نشد.

در این جا، h_m آنتالپی سیال، G_m شار جرمی، ρ_m چگالی، A_z سطح عبوری سیال، f ضریب اصطکاک، q'' شار گرمایی، D_e قطر ترموهیدرولیکی، P فشار و Ph سطح گرم شونده است. معادله‌های ۲، ۳، ۴ و سایر رابطه‌های سازنده، شرایط را برای تعیین پارامترهای $G_m(z, t)$ ، $p(z, t)$ و $h_m(z, t)$ با استفاده از شرایط ورودی و مرزی فراهم می کند. شرایط مرزی برای حل معادله‌ها با در نظر گرفتن $P(0, t)$ و $h_m(0, t)$ در ورودی کانال و $P(L, t)$ در خروجی کانال استفاده می شود. از این گذشته پارامترهای ρ_m و f برای تعریف کامل مسأله مورد استفاده قرار می گیرد. معادله‌ی حالت برای چگالی به صورت دیفرانسیلی با وابستگی به h_m و P بیان می شود:

$$\rho_m = \rho_m(h_m, P) \quad (5)$$

از معادله‌ی ۵ داریم:

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} = \frac{\partial \rho_m}{\partial h_m} \left| p \frac{\partial h_m}{\partial t} + \frac{\partial \rho_m}{\partial p} \right| h_m \frac{\partial P}{\partial t} = R_h \frac{\partial h_m}{\partial t} + R_p \frac{\partial P}{\partial t} \quad (6)$$

$$R_h = \frac{\partial \rho_m}{\partial h_m} \Big|_{p=const}, \quad R_p = \frac{\partial \rho_m}{\partial p} \Big|_{h_m=const} \quad (7)$$

در این جا، R_h نسبت تغییرات چگالی به آنتالپی و R_p نسبت تغییرات چگالی به فشار است. با ترکیب معادله‌های ۲ و ۶، چنین به دست می آید.

$$R_h \frac{\partial h_m}{\partial t} + R_p \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial G_m}{\partial z} = 0 \quad (8)$$

معادله‌های (۸) و (۴) با جای‌گزینی $(\partial p/\partial t)$ و $(\partial h_m/\partial t)$ می‌تواند در معادله‌های زیر، ترکیب و برای محاسبه‌ها استفاده شود:

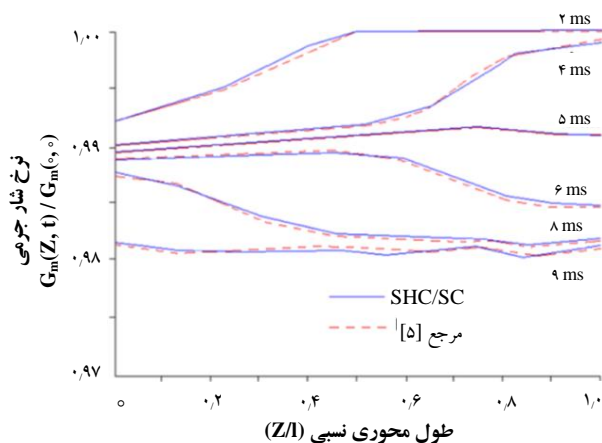
$$\frac{\rho_m}{c^r} \frac{\partial P}{\partial t} + \rho_m \frac{\partial G_m}{\partial z} + \frac{R_h G_m}{\rho_m} \frac{\partial P}{\partial z} - R_h G_m \frac{\partial h_m}{\partial z} = -R_h \left[\frac{q'' Ph}{A_z} + \frac{f G_m^r |G_m|}{r D_e \rho_m^r} \right] \quad (9)$$

۳. یافته‌ها

فشار تقریباً به انتهای کانال می‌رسد. تغییرات شار جرمی در ۵ ms نشان‌دهنده‌ی موج برگشتی از انتهای کانال است. برای چند میلی ثانیه موج معکوس منجر به افت بیش‌تر شار جرمی در انتهای کانال نسبت به ابتدای آن می‌شود. برای نشان دان اهمیت نتیجه‌های به دست آمده در کد محاسباتی بسط داده شده و اعتبارسنجی کار، پدیده‌ی مورد نظر در کد ریلپ (که کاربرد گسترده‌ای در محاسبات مهندسی هسته‌ای دارد) نیز شبیه‌سازی شد. تغییرات شار جرمی در ۵ ms و ۹ ms توسط کد ریلپ [۱۱] محاسبه و در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تغییرات بسیار محدودی در شار جرمی نشان داده شده است و کد ریلپ اثرهای صوت را، که نقش مهمی در این تغییرات شدید بازی می‌کند، در نظر نمی‌گیرد. این کد در مقایسه با کد توسعه یافته‌ی SHC/SC، در محاسبات تأخیر دارد و در زمان‌های کم‌تر از ۴/۲ ms قابلیت محاسبه ندارد.

جدول ۲. شرایط بهره‌برداری و هندسه‌ی رآکتور PWR [۵]

شرایط بهره‌برداری	PWR
طول کانال (m)	۳٫۶۶
فاصله‌ی میله‌های سوخت (mm)	۱۲٫۸
نرخ خطی حرارت (kW m^{-1})	۱۷
شار جرمی ($\text{kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	۴۱۲۵
فشار ورودی (MPa)	۱۵٫۵
فشار خروجی (MPa)	۱۵٫۴۲
آنتالپی ورودی (kJ kg^{-1})	۱۳۳۷٫۲

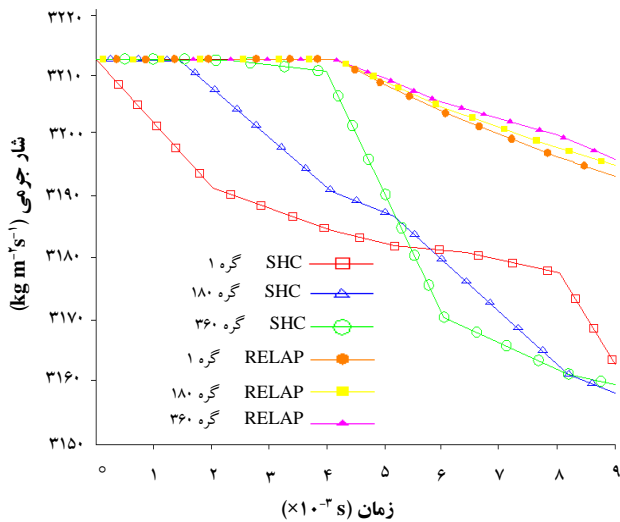


شکل ۲. پاسخ کوتاه مدت گذره‌ی فشار ورودی PWR.

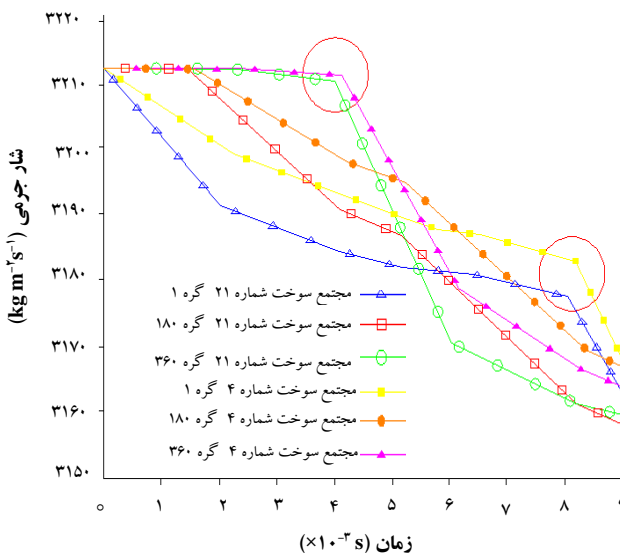
برای اعتبارسنجی محاسبات، حادثه‌ی افت فشار سریع خنک‌کننده در رآکتور آب تحت فشار (PWR) (مشخصه‌ها در جدول ۲ درج شده است) توسط روش SC شبیه‌سازی شد. افت ناگهانی فشار در ورودی کانال منجر به کاهش شار جرمی ابتدا در ورودی کانال و سپس با گذشت زمان در طول کانال شد [۵]. تغییرات محوری شار جرمی بهنجار شده، در شکل ۲ نمایش داده شده است. با توجه به سرعت صوت در سیال (900 m s^{-1})، حدود ۴/۱ ms طول می‌کشد تا موج فشار طول کانال را طی کند. کاهش شار جرمی تا کم‌تر از این زمان به انتهای کانال نمی‌رسد، بنابراین نقطه‌های بالاتر موج فشار را احساس نمی‌کنند. با توجه به فرض ثابت بودن فشار خروجی، برای $t > 4.1 \text{ ms}$ موج برگشتی فشار بر روی شار جرمی برای مدت کوتاهی اثر می‌کند. وقتی موج مخالف (با بزرگی یکسان، در جهت مخالف) حرکت می‌کند، موج ورودی رقیق شده در مرز خروجی فشرده می‌شود. نمایه‌ی فشار در $t \approx 5 \text{ ms}$ و بیش‌تر، تأثیر پیشرفت موج برگشتی در تمام مسیر از خروجی تا ورودی را نمایش می‌دهد. در این بازه‌ی زمانی کوتاه نرخ شار جرمی متوسط تنها با کاهش از ۱ تا ۰٫۹۸ روبه‌رو است.

شکل ۲ تطابق خوبی بین نتایج به دست آمده و مرجع [۵] نمایش می‌دهد. پس از اطمینان از درستی کد توسعه داده شده (SHC/SC)، نمودارهای تغییرات شار جرمی با استفاده از اثر صوت در پخش موج فشار برای گذره‌ی مورد نظر در مجتمع سوخت داغ قلب رآکتور VVER-1000 بررسی شد. شکل ۳ تغییرات شار جرمی در طول مجتمع سوخت را در پنج زمان مختلف نشان می‌دهد. کاهش شار جرمی در $10 \mu\text{s}$ در حدود $0.35 \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ است و در ابتدای کانال اتفاق می‌افتد. بعد از ۱ ms این مقدار برای گره اول از $0.35 \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ به $12 \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ افزایش پیدا می‌کند. با گذر زمان تا ۲ ms افت شار جرمی تقریباً به نیمی از طول کانال می‌رسد که با کاهش در حدود $25 \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ همراه است. بعد از گذشت ۴ ms اثر افت

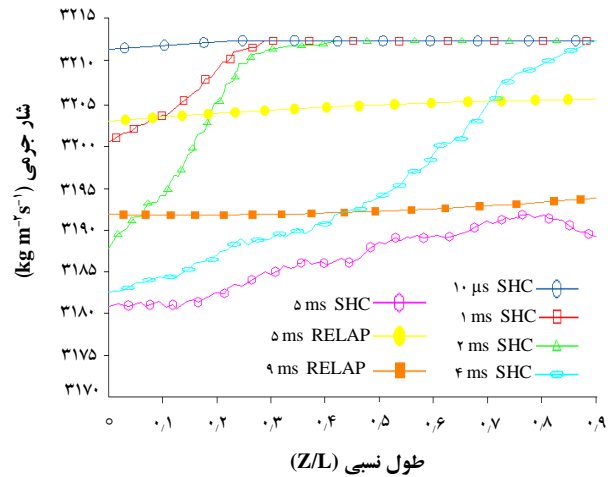
نمایش داده شده است. شار جرمی در نقطه‌ی ابتدایی با یک افت شدید تا ۲ ms برای مجتمع شماره ۲۱ روبه‌رو می‌شود. در مجتمع شماره ۴ به دلیل کم‌تر بودن مقدار شار گرمایی نرخ افت شار جرمی کاهش می‌یابد. اثر موج فشار برای هر کدام از این دو مجتمع، با تأخیری در حدود ۰/۱۵ ms اتفاق می‌افتد. این اختلاف در قسمت‌هایی از شکل با دایره مشخص شده است.



شکل ۳. تغییرات شار جرمی در طول کانال مجتمع سوخت داغ در پنج زمان مختلف.



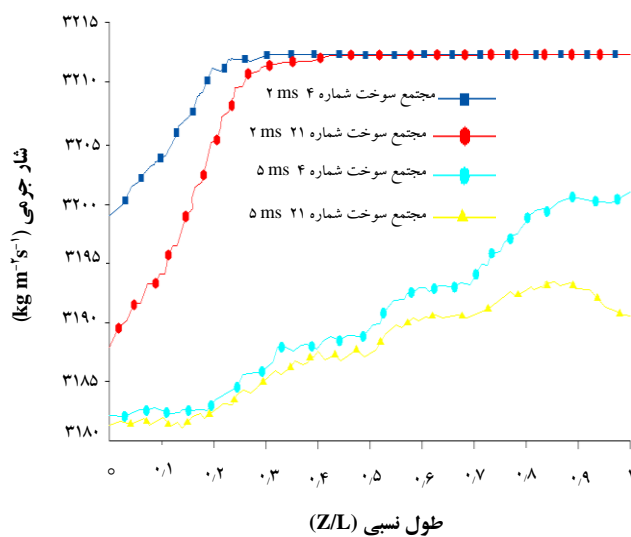
شکل ۴. تغییرات شار جرمی در طول مجتمع سوخت در ۳ گره مختلف.



شکل ۵. تغییرات شار جرمی در نقاط ابتدایی، میانی و انتهایی طول نسبی مجتمع سوخت داغ (شماره ۲۱) و مجتمع سوخت شماره ۴.

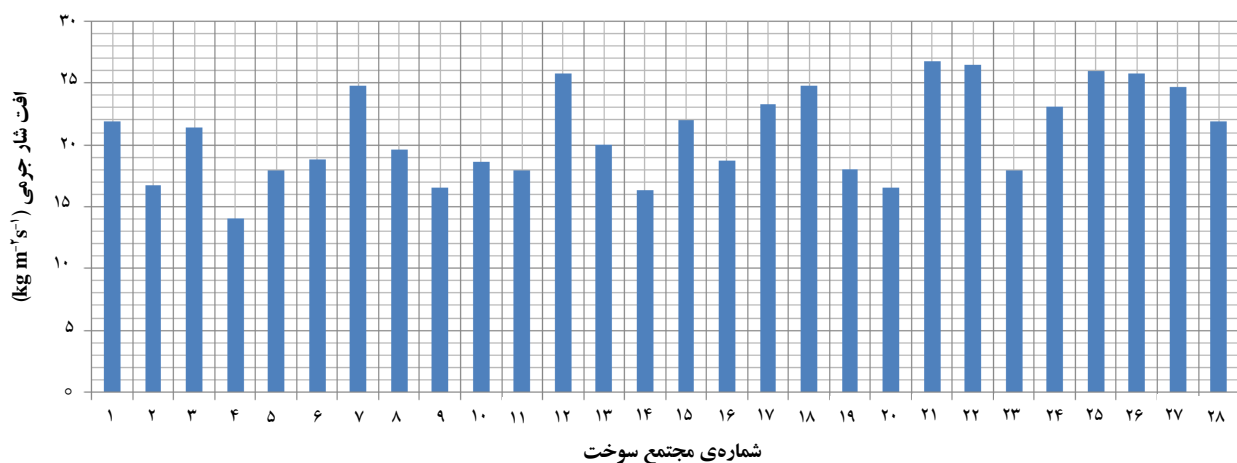
نتیجه‌های به دست آمده از شبیه‌سازی تغییرات شار جرمی در نقاط ابتدا، میانی و انتهایی طول نسبی مجتمع سوخت، تا ۹ ms در کد توسعه داده شده‌ی SHC/SC و ریلپ در شکل ۴ نشان داده شده است. شار جرمی در نقطه‌ی ابتدایی با یک افت ناگهانی روبه‌رو می‌شود و در نقطه‌ی میانی مجتمع سوخت بعد از ۱/۲ ms افت پیدا می‌کند. همین‌طور افت شار جرمی برای نقطه‌ی گره‌های بالاتر احساس می‌شود، نمودار با شدت بیش‌تری افت پیدا می‌کند. نمایه‌ها تأثیر موج پیش‌رونده معکوس در طول کانال از خروجی به ورودی را در حدود ۴ ms و بیش‌تر نمایش می‌دهند. از آن‌جا که تغییرات فشار، تابع موج است (اثر آکوستیک)، در نقطه‌ی انتهایی با برگشت موج، شاهد برهم‌نهی سازنده‌ی موج پیش‌رونده و معکوس آن خواهیم بود. چنین اثری منجر به کاهش شدیدتر شار جرمی می‌شود. پس از ۸ ms موج افت فشار تشدید شده در اثر برهم‌نهی به نقطه‌ی ابتدایی بر می‌گردد، که منجر به افزایش مجدد افت شار جرمی می‌شود. یافته‌های ریلپ نشان‌دهنده‌ی نمایه‌ی تغییرات شار جرمی با شیب ثابت در سه نقطه‌ی ابتدایی، وسطی و انتهایی کانال است و توصیف مناسبی از موج فشار عبوری ارائه نمی‌دهد. در شکل ۵ تغییرات شار جرمی در نقطه‌های ابتدایی، میانی و انتهایی طول نسبی مجتمع سوخت برای مجتمع سوخت داغ (شماره ۲۱) و سردترین مجتمع سوخت (شماره ۴) با استفاده از کد SHC،

سهم تولید توان گرمایی در هر مجتمع است. از آنجایی که شار گرمایی تابع چگالی و سرعت است با تغییر چگالی که به دلیل تغییرات دمای خنک‌کننده رخ می‌دهد و آن نیز به نوبه‌ی خود، به PPF هر مجتمع سوخت بستگی دارد، شار هر مجتمع سوخت نیز دچار تغییر می‌شود. زمانی که افت فشار شدید است، هر مجتمع که شار گرمایی بالاتری تولید می‌کند، خنک‌کننده را سریع‌تر تخلیه می‌کند. بنابراین افت شار گرمایی بیشتر می‌شود. این میزان افت برای داغ‌ترین مجتمع سوخت در حدود $25 \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ و برای سردترین مجتمع در حدود $14 \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ است.



شکل ۶. تغییرات شار گرمایی در طول مجتمع سوخت شماره‌ی ۴ و ۲۱.

شکل ۶ تغییرات شار گرمایی در طول داغ‌ترین و سردترین مجتمع سوخت را نمایش می‌دهد. با افزایش زمان تا 2 ms افت شار گرمایی تقریباً در مجتمع سوخت داغ به نیمی از طول کانال می‌رسد. شار گرمایی پس از این زمان $25 \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ کاهش می‌یابد. در سردترین مجتمع سوخت شار گرمایی پس از کاهش در حدود $15 \text{ kg m}^{-2}\text{s}^{-1}$ در ارتفاعی حدود 0.4 طول کانال کاهش پیدا می‌کند. در سردترین مجتمع سوخت به دلیل کم‌تر بودن میزان شار گرمایی نرخ افت شار گرمایی کاهش می‌یابد. موج فشار، کانال را با تأخیری در حدود 0.15 ms نسبت به مجتمع سوخت داغ طی می‌کند. در زمان 5 ms تغییرات در مجتمع گرم‌تر (شماره ۲۱) زودتر به انتهای کانال می‌رسد و ضربه‌ی ناشی از آن سریع‌تر احساس می‌شود. در شکل ۷ تغییرات شار گرمایی در نقطه‌ی ابتدایی هر مجتمع سوخت در یک ششم قلب رآکتور VVER-۱۰۰۰ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افت شار گرمایی در هر مجتمع به مقدار سهم آن در تولید توان گرمایی قلب وابسته است. به طوری که مشاهده می‌شود با افزایش شار گرمایی، شار گرمایی با سرعت بیشتری کاهش پیدا می‌کند. از آنجا که در انجام محاسبات یکی از مهم‌ترین عوامل در تفاوت مجتمع‌های سوخت، سهم هر مجتمع سوخت در تولید توان گرمایی (PPF)، در نظر گرفته شده و بزرگی این عدد به شرایط و مکان هر مجتمع وابسته است، بنابراین مهم‌ترین دلیل اختلاف در شار گرمایی هر مجتمع سوخت،



شکل ۷. تغییرات شار گرمایی در نقطه‌ی ابتدایی هر مجتمع سوخت در یک ششم قلب رآکتور VVER-۱۰۰۰.

۴. بحث و نتیجه گیری

مراجع

1. P.K. Chan, *IEEE Transaction on Computer Aided Design*, **10**, 8, 1078–1079 (1991).
2. C.K. Ooi, K.N. Seetharamu, Z.A.Z. Alauddin, G.A. Quadir, K.S. Sim, T.J. Goh, Fast transient solutions for heat transfer, 2003, in Proceedings of the Conference on Convergent Technologies for the Asia-Pacific Region (IEEE TENCON '03), **1**, 469–473 (2003).
3. P. Liu, H. Li, L. Jin, W. Wu, S.X.D. Tan, J. Yang, *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, **25**, 12, 2882–2892 (2006).
4. K.N. Proskuryakov, *Recent Adv Petrochem Sci*, Volume 2 Issue 1 (2017).
5. N.E. Todreas, M.S. Kazimi, *Nuclear systems II: Elements of thermal hydraulic design* (Vol. 2). Taylor & Francis (1990).
6. G. Forti, E. Vincenti, *The codes costanza for the dynamics of liquid cooled nuclear reactor, joint nuclear research center Ispra stablishment-Italy, reactor physics department reactor teory and analysis* (1967).
7. M. Hosseini, H. Khalafi, S. Khakshournia, *Progress in Nuclear Energy*, **85**, 108-120 (2015).
8. J.C.M. Leung, K.A. Gallivan, R.E. Henry, *Critical Heat Flux Predictions During Blow down Transient*, Argonne National Laboratory, Argonne, IL60439, U.S.A (1981).
9. AEOI, *Reactor Final Safety Analysis Report VVER-1000 Bushehr, Chapter 4, Atomic Energy Organization of Iran* (2005).
10. W. Wagner, H.J. Kretzschmar, *International Steam Tables, Second edition, Faculty of Mechanical Engineering Chair of Thermo-dynamics* (2007).
11. RELAP5/SCDAP//MOD3.2 Code Manuals, A Computer Code for Best-Estimate Transient Simulation of Light Water Reactor Coolant Systems During Severe Accidents, Prepared for the U.S. 1997, Nuclear Regulatory Commission, Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, NUREG/CR-6150.

شبهه سازی گذرهی افت فشار ناگهانی قلب رآکتور VVER-۱۰۰۰ با استفاده از پدیدهی آکوستیک و روش SC در تک کانال گرم شونده مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا نتایج با شبهه سازی گذرهی مورد نظر در یک رآکتور آب تحت فشار (PWR) مورد محک واقع شد. پس از اطمینان از درستی برنامهی توسعه داده شده، نسبت به شبهه سازی گذرهی مورد نظر در قلب رآکتور VVER-۱۰۰۰ با استفاده از کد ریلپ اقدام شد و مورد مقایسه قرار گرفت. در ورودی کانال، به دلیل کاهش فشار خنک کنندهی ورودی، شار جرمی شروع به کاهش می کند، اغتشاش هایی ایجاد می شود و با گذر زمان در طول کانال پخش می شود. بعد از این که موج فشار به انتهای کانال می رسد، موج فشار برگشتی بر روی نمایهی شار جرمی برای مدت کوتاهی اثر می کند و در جهت مخالف با بزرگی یکسان طول کانال را طی می کند. موج معکوس باعث کاهش بیش تر شار جرمی در گره های بالایی با گذشت زمان می شود. نشان داده شد که کد ریلپ قادر به احساس گذرهی افت فشار در زمان های کم تر از ۴/۲ ms نیست. داده های به دست آمده از کد توسعه داده شدهی SHC/SC برای زمانی که حجم زیادی از خنک کننده در زمان بسیار کوتاهی از دست می رود با فرض تراکم پذیر بودن سیال، قابل قبول است و نشان دهندهی قابلیت درستی و دقت محاسبه ها برای گذره های سریع است. واکنش هر مجتمع سوخت به افت شار جرمی، به میزان سهم هر مجتمع در تولید توان گرمایی قلب وابسته است، به طوری که هر اندازه شار گرمایی افزایش پیدا می کند، شار جرمی با سرعت بیش تری کاهش پیدا می نماید. دست یابی به نتیجهی کار انجام شده، بسیار حایز اهمیت است. تاکنون تغییرات شار جرمی در این زمان کوتاه ثابت در نظر گرفته می شد و نوع اغتشاش های ایجاد شده شناخته شده نبود. شناخت این پدیده و تحلیل رفتاری آن با استفاده از اثر صوت، در بررسی تنش های وارد شده به ساختار قلب، کنترل حادثه ها و انتخاب مواد سازنده، نقشی اساسی بازی خواهد کرد.

