



تحلیل ترموهیدرولیکی محفظه‌ی شتاب‌دهنده‌ی رودوترون

احسان دهقان، حسین کاظمی نژاد*، علی محمد پورصالح

پژوهشکده کاربرد پرتوها، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۶۵-۳۴۸۶، تهران - ایران

چکیده: شتاب‌دهنده‌ها سیستم‌هایی هستند که از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی برای شتاب دادن و کنترل ذرات باردار تا مرز سرعت نور استفاده می‌کنند. حرارت تولید شده به وسیله‌ی پرتو الکترون در محفظه‌ی شتاب از طریق چرخش آب در دیواره‌ی محفظه‌ی شتاب‌دهنده جابه‌جا می‌شود. اتلاف حرارتی روی سطح داخلی محفظه‌ی شتاب‌دهنده و هم‌چنین ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری محاسبه، و محفظه در حالت‌های با و بدون خنک‌سازی با آب با استفاده از نرم‌افزار ANSYS 12 شبیه‌سازی و سپس دماهای به دست آمده از شبیه‌سازی با مقادیر اندازه‌گیری شده مقایسه شد. هم‌چنین حالت‌های مختلف گرفتگی برای مجراهای آب موجود بر روی بدنه‌ی محفظه‌ی شتاب‌دهنده در نظر گرفته شد. با توجه به نتایج به دست آمده، شبیه‌سازی دمای دیواره‌ی محفظه‌ی شتاب‌دهنده در شرایط کاری از دقت مناسبی برخوردار است و در نقاطی که احتمال گرفتگی مسیر خنک‌کننده وجود دارد، دمای دیواره بالاتر از سایر نقاط پیش‌بینی شد.

کلیدواژه‌ها: شتاب‌دهنده‌ی الکترون، تحلیل ترموهیدرولیکی، اثر گرفتگی مجراهای خنک‌کننده

Thermal-Hydraulic Analysis of Rhodotron Accelerator Cavity

E. Dehghan, H. Kazeminejad*, A.M. Poursaleh

Research School of Radiation Applications, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 11365-3486, Tehran - Iran

Abstract: Electron accelerators use electric and magnetic fields to accelerate and control charged particles to the close proximity of the speed of light. The results of the experimental test performed on the Yazd Rhodotron cavity cooling system as well as the relevant numerical analysis carried out by the ANSYS 12 code are presented. It was found that the numerical prediction for the cavity wall temperature under normal operating condition was in reasonable agreement with the corresponding experimental result. In addition, due to the blockage effect of the cooling channels, the cavity wall temperature was higher than normal operating conditions.

Keywords: Electron Accelerator, Thermal-Hydraulic Analysis, Blockage Effect of Cooling Channels



۱. مقدمه

اولین نمونه صنعتی رودوترون در سال ۱۹۹۳ در بلژیک ساخته شد [۱، ۲، ۳].

همانند تمام شتاب‌دهنده‌ها، رودوترون نیز بر همان اصل بنیانی عبور الکترون‌ها از یک میدان الکتریکی قوی، به منظور افزایش انرژی کار می‌کند. چون در رودوترون، میدان الکتریکی در یک محفظه‌ی شتاب قرار دارد و الکترون‌ها برای شتاب بیش‌تر توسط میدان‌های مغناطیسی به این محفظه برگردانده می‌شوند، لذا این شتاب‌دهنده می‌تواند به صورت پیوسته عمل نماید.

در شکل ۱ تصویر شتاب‌دهنده‌ی رودوترون مدل TT200 و در شکل ۲ نمای برش خورده از اجزای شتاب‌دهنده‌ی رودوترون نشان داده شده است.



شکل ۱. شتاب‌دهنده‌ی رودوترون مدل TT200.

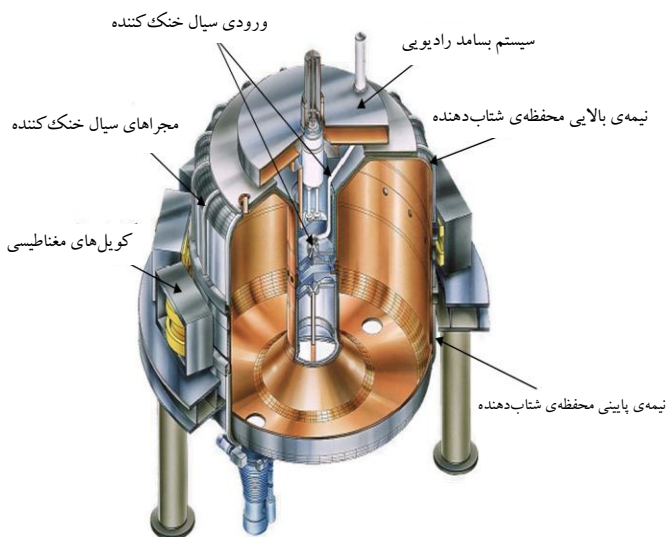
سه نوع پرتو گاما، الکترون و ایکس در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. این پرتوها اگرچه با روش‌های مختلف تولید می‌شوند، ولی در اصل برای یک منظور استفاده می‌شوند. انرژی منتقل شده به وسیله این پرتوها در فرایند پرتودهی تغییرات فیزیکی و شیمیایی ایجاد می‌کند و در نهایت منجر به پلی‌مریزاسیون، پیوند عرضی، استریلیزاسیون و یا پاستوریزاسیون سرد (در مواد غذایی) می‌شود. این نوع پرتوها پرتوهای یوننده‌اند، زیرا انرژی آن‌ها در حدی است که می‌تواند الکترون‌ها را از اتم‌ها و مولکول‌ها کنده و آن‌ها را به یون تبدیل کند. از آن‌جا که انرژی‌های مورد استفاده در پرتودهی، در حدی نیست که بتواند در هسته‌ی اتم تغییراتی به وجود آورد، لذا محصول پس از پرتودهی پرتوزا نبوده و بلافاصله قابل استفاده است. شتاب‌دهنده‌ها سیستم‌هایی هستند که از میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی برای شتاب دادن و کنترل ذرات باردار تا مرز سرعت نور استفاده می‌کنند.

شتاب‌دهنده‌ی الکترون پژوهشکده کاربرد پرتوها (یزد) از نوع رودوترون با چهار خروجی عمودی و افقی با انرژی‌های ۵ و ۱۰ MeV است. قدرت نهایی این دستگاه ۱۰۰ kW بوده و تا دو برابر قابل افزایش است و می‌تواند پرتوهای ایکس و الکترون تولید نماید.

محفظه‌ی شتاب‌دهنده الکترون به دلیل «تولید» انرژی، تحت اثر تنش‌های حرارتی قرار دارد و این حرارت با چرخش آب به دور محفظه‌ی شتاب‌دهنده جابه‌جا می‌شود. هدف این مقاله تحلیل ترموهیدرولیکی محفظه‌ی شتاب‌دهنده‌ی الکترون از طریق شبیه‌سازی با نرم‌افزار ANSYS 12 و مقایسه‌ی نتایج آن با مقادیر به دست آمده از اندازه‌گیری نقاط مختلف محفظه‌ی شتاب‌دهنده است.

۲. شتاب‌دهنده‌ی رودوترون

اصول اولیه‌ی رودوترون اولین بار در سال ۱۹۸۹ توسط ژ. پوتیه از کمیساریای انرژی اتمی فرانسه (CEA) مطرح شد. در سال ۱۹۹۰ اولین نمونه‌ی رودوترون با میانگین قدرت ۲۰ kW و انرژی ۳ MeV توسط کمیساریای انرژی اتمی فرانسه ساخته شد. سپس در سال ۱۹۹۱ همکاری کمیساریای انرژی اتمی فرانسه و شرکت IBA بلژیک آغاز و روند صنعتی‌سازی رودوترون شروع شد.



شکل ۲. نمای برش خورده‌ی اجزای رودوترون.

باریکه‌ی الکترون چرخیده و دوباره به داخل محفظه‌ی شتاب هدایت شود و انرژی باریکه الکترون به 3MeV برسد این مراحل مرتباً تکرار می‌شود تا در نهایت باریکه‌ی الکترون حداکثر انرژی مجاز یعنی 10MeV را دریافت کند. نکته‌ی مهم و قابل توجه این است که باریکه‌ی الکترون در میدان مغناطیسی تنها منحرف می‌شود در حالی که در میدان الکتریکی انرژی آن افزایش می‌یابد. عواملی که باعث گرم شدن بدنه‌ی محفظه‌ی شتاب‌دهنده می‌شوند عبارت‌اند از ۱. توان الکتریکی اتلافی امواج الکترومغناطیسی حاصل از بسامد رادیویی، ۲. تابش گسیل شده از الکترون در اثر شتاب گرفتن در داخل محفظه‌ی شتاب‌دهنده و ۳. برخورد الکترون با بدنه‌ی محفظه‌ی شتاب‌دهنده. عوامل ۲ و ۳ در برابر توان الکتریکی اتلافی بالا (عامل ۱) ناچیز بوده و قابل صرف نظر کردن هستند [۵، ۶].

۳. محاسبه‌ی اتلاف حرارتی و ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری^(۳)

برای اندازه‌گیری اتلاف حرارتی، دمای ورودی و خروجی خنک‌کننده‌ی محفظه‌ی شتاب‌دهنده (مطابق شکل ۳) به وسیله‌ی دو عدد ترموکوپل از نوع PT100 ثبت شد دمای ورودی، خروجی و دبی ثبت شده به ترتیب 17.2°C و 23.4°C ، و $10\text{m}^3/\text{hr}$ بود.



شکل ۳. محل نصب ترموکوپل‌های PT100 در ورودی و خروجی سیستم خنک‌کننده.

شتاب‌دهنده‌ی رودترون از سه قسمت اصلی تفنگ الکترونی^(۱)، محفظه‌ی شتاب و خروجی‌ها یا خطوط انتقال^(۲) تشکیل شده است. باریکه‌ی الکترون ابتدا در تفنگ الکترونی تولید شده و سپس در محفظه شتاب می‌گیرد. این محفظه از دو استوانه‌ی هم محور با قطر تقریبی 2m تشکیل شده است. این محفظه توسط پمپ‌های خلأ تخلیه می‌شود، و امواج الکترومغناطیسی که توسط مدارهای بسامد رادیویی تولید می‌شوند در حکم میدان الکتریکی برای الکترون عمل می‌کنند. مقدار این میدان در وسط محفظه بیشینه بوده و به صورت قرینه در کناره‌ها صفر می‌شوند. البته امواج الکترومغناطیسی تماماً دارای موج مغناطیسی و الکتریکی‌اند که این دو بر هم عمود بوده و با هم اختلاف فاز دارند. لذا این موج در هر لحظه باعث می‌شود استوانه‌های داخلی و بیرونی، پتانسیل‌های مثبت و منفی، که تعیین‌کننده‌ی جهت میدان الکتریکی است، به خود بگیرند. بسامد تعویض این میدان $107/4$ مگاهرتز است. هر فاصله‌ی زمانی تعویض میدان الکتریکی یک دور نامیده می‌شود. در دور اول، استوانه‌ی داخلی دارای پتانسیل مثبت و استوانه‌ی بیرونی دارای پتانسیل منفی است که خود میدان الکتریکی به قدرت 500kV ایجاد می‌کند. الکترون که دارای بار منفی است با مشاهده‌ی پتانسیل مثبت به شدت به سمت آن شتاب گرفته و حدود 0.5MeV انرژی کسب می‌کند. در دور بعدی جهت میدان الکتریکی یا در واقع پتانسیل استوانه‌ها عوض می‌شود، به طوری که استوانه‌ی داخلی که در دور اول مثبت بود منفی، و استوانه‌ی بیرونی مثبت می‌شود. با توجه به این که الکترون در دور اول تا استوانه‌ی داخلی شتاب گرفته است، مجدداً در پتانسیل مثبت استوانه‌ی خارجی قرار گرفته و با کسب انرژی 0.5MeV بیش‌تر شتاب می‌گیرد و مجموع انرژی‌های دورهای اول و دوم به 1MeV بالغ می‌شود [۴].

روبه‌روی خروجی باریکه‌ی الکترون در هر مرحله کویل‌های مغناطیسی (آهنربای مغناطیسی) بسیار قوی قرار دارد که باعث می‌شود باریکه در داخل محفظه‌ی این کویل مغناطیسی چرخیده، مجدداً داخل محفظه‌ی شتاب شده و دورهای مرحله‌ی اول تکرار شوند. انرژی کسب شده توسط الکترون در این مرحله به 2MeV می‌رسد. در خروجی این باریکه‌ی الکترون نیز کویل مغناطیسی با نیروی مغناطیسی بیش‌تر قرار داده شده است که باعث می‌شود



با توجه به معادله‌ی (۱) داریم:

$$q = \dot{m} c_p \Delta T = \frac{10 \cdot (\text{m}^3 \text{h}^{-1}) \times 997,58 (\text{kg m}^{-3})}{3600 (\text{s})} \times 4,180 (\text{kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}) \times 6,2 (^\circ\text{C}) = 71,81 \text{ kW}$$

بنابراین اتلاف حرارتی محفظه‌ی شتاب‌دهنده در شرایط کاری تقریباً ۷۲kW برآورد شد.

۴. تحلیل ترموهیدرولیکی محفظه‌ی شتاب‌دهنده با استفاده از نرم‌افزار ANSYS 12

برای شبیه‌سازی ترموهیدرولیکی محفظه‌ی شتاب‌دهنده، با اعمال یک توان گرمایی معادل ۷۲kW بر روی سطح داخلی آن دماهای نقاط مختلف محفظه در شرایط پایا محاسبه شد. ابتدا محفظه‌ی شتاب‌دهنده با استفاده از نرم‌افزار SolidWorks 2010 مدل‌سازی و سپس در محیط نرم‌افزار ANSYS 12، شبکه‌بندی به صورت خودکار انجام شد. شکل ۴ شبکه‌بندی مورد استفاده برای مدل‌سازی محفظه‌ی شتاب‌دهنده در محیط نرم‌افزار ANSYS 12 را نشان می‌دهد. تمامی قسمت‌های محفظه‌ی شتاب‌دهنده از فولاد کربن A 516 و قطعه‌ی روزنه‌دار و فلنچ‌های مربوط به مگنت‌ها از جنس فولاد زنگ نزن ۳۰۴ (SS304) در نظر گرفته شد (لازم به توضیح است که جنس محفظه و قسمت‌های مختلف آن با استفاده از آزمایش‌های غیرمخرب تعیین شده است). فولاد کربن A 516 برای ساخت مخازن تحت فشار و دیگ‌های بخار مورد استفاده قرار می‌گیرد. مشخصات فیزیکی و مکانیکی فولاد کربن A 516 در جدول ۱ آورده شده است. فولاد زنگ نزن ۳۰۴ یکی از آلیاژهای فولادی است که به رنگ براق بوده و در آن عناصر کرم، نیکل، کربن، منگنز، فسفر، سیلیسیم، گوگرد و نیتروژن به کار رفته است. مشخصات فیزیکی و مکانیکی فولاد زنگ نزن ۳۰۴ در جدول ۲ آورده شده است.

در بخش گرمایی^(۴) نرم‌افزار ANSYS 12 یک شار حرارتی برابر با ۷۲kW در سطح داخلی محفظه‌ی شتاب‌دهنده در نظر گرفته شد. دمای اولیه‌ی آب ۱۵°C انتخاب شد و با توجه به حالت‌های مختلف مورد بررسی، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری مربوط به هر بخش که از قبل محاسبه شده بود برای آن بخش به کار گرفته شد. برای شبیه‌سازی هوای اطراف محفظه‌ی شتاب‌دهنده از مدل ساده شده‌ی موجود در نرم‌افزار^(۵) با دمای اولیه

حرارت جابه‌جا شده از خنک‌کننده با استفاده از معادله‌ی زیر

محاسبه شد [۸، ۷]

$$q = \dot{m} c_p \Delta T \quad (1)$$

که در آن، q مقدار حرارت، \dot{m} دبی جرمی جریان و ΔT مقدار تغییرات دمایی است.

عدد رینولدز برای تعیین ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی

اجباری (h) از رابطه‌ی زیر محاسبه شد

$$Re_f = \frac{\rho_f u_\infty d}{\mu_f} \quad (2)$$

که در آن، Re_f عدد رینولدز، ρ_f چگالی، μ_f گرانروی، u_∞ سرعت و d قطر مجرای عبور سیال است.

با توجه به مغشوش بودن جریان سیال برای تعیین ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری از رابطه‌ی دیتوس- بولتر استفاده شد

$$Nu_f = 0,23 Re_f^{0,8} Pr_f^{0,4} = \frac{hd}{k_f} \quad (3)$$

که در آن، Nu_f عدد ناسلت، Pr_f عدد پرانتل و k_f ضریب انتقال حرارتی سیال است.

برای عبور سیال از مقطع‌های غیر مدور از قطر هیدرولیک

D_H استفاده شد که از معادله‌ی زیر به دست می‌آید

$$D_H = \frac{4A}{P} \quad (4)$$

که در آن، A سطح مقطع و p محیط آن است.

دمای متوسط لایه‌ی نازک با استفاده از دماهای ورودی و

خروجی خنک‌کننده تعیین شد

$$T_f = \frac{T_w + T_\infty}{2} = \frac{17,2 + 23,4}{2} = 20,3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

سرعت خنک‌کننده با توجه به دبی جرمی جریان

($\dot{m} = 10 \text{ m}^3 \text{h}^{-1}$) و قطر هیدرولیکی معادل برابر با $2,5 \text{ ms}^{-1}$ بود.

سایر متغیرهای مورد نیاز معادله‌های (۱) تا (۳) برابراند با:

$$\begin{aligned} u_\infty &= 2,5 \text{ ms}^{-1} & k_f &= 0,63 \text{ W m}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \\ \rho_f &= 997,58 \text{ kg m}^{-3} & c_{pf} &= 4,180 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \\ Pr_f &= 6,94 & \mu_f &= 1,0004 \times 10^{-3} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1} \end{aligned}$$

۱.۴ شبیه‌سازی بدون خنک‌کننده‌ی آب

در این حالت تنها انتقال حرارت جابه‌جایی آزاد بین جداره‌ی بیرونی محفظه‌ی شتاب‌دهنده و هوای ساکن اطراف آن در نظر گرفته شد و از مدل موجود در نرم‌افزار ANSYS 12 استفاده شد. لازم به ذکر است که مجراهای عبور سیال اطراف بدنه‌ی محفظه‌ی شتاب‌دهنده خالی از آب بود.

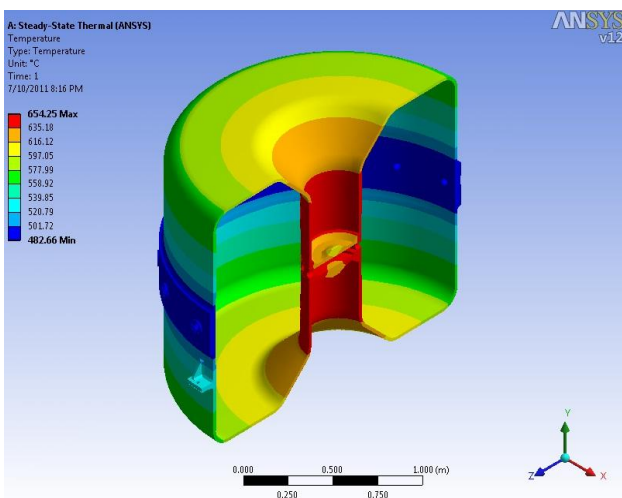
شکل ۵ نتیجه‌ی شبیه‌سازی حالت نخست را نشان می‌دهد. با توجه به محاسبه‌ی انجام شده حداکثر دمای دیواره‌ی محفظه‌ی شتاب‌دهنده در قسمت مرکزی آن و برابر با 663.1°C بود.

۲.۴ شبیه‌سازی با خنک‌کننده‌ی آب

با توجه به شبیه‌سازی انجام شده برای حالت اول بدیهی است که جابه‌جایی کل حرارت تولید شده در محفظه‌ی شتاب‌دهنده‌ی بدون خنک‌کننده‌ی آب امکان‌پذیر نیست. لذا برای کاهش دمای محفظه از خنک‌کننده‌ی آب استفاده می‌شود. بنابراین ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری برای سیال خنک‌کننده از روابط جریان اجباری سیال محاسبه و به عنوان شرط مرزی اعمال شد.

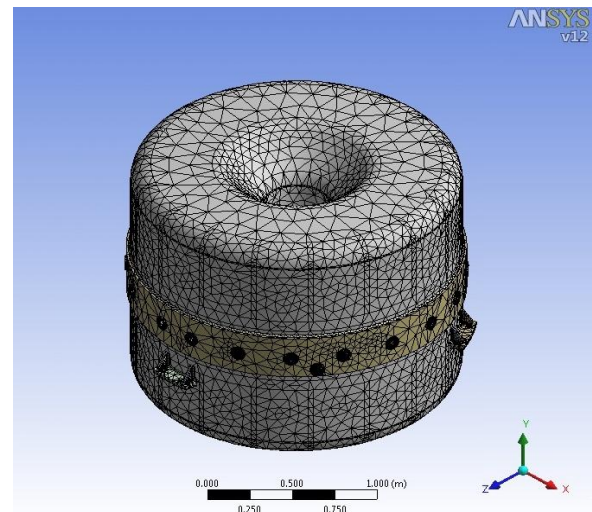
با توجه به معادله‌ی (۲)، سرعت سیال و قطر معادل هیدرولیکی مجراهای تعبیه شده برای عبور خنک‌کننده در دیواره‌ی محفظه‌ی شتاب‌دهنده عدد رینولدز محاسبه شد و از معادله‌ی (۳) ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری به دست آمد. قابل ذکر است با توجه به متفاوت بودن قطر معادل هیدرولیکی مجراها و ثابت بودن دبی جرمی جریان، سرعت سیال در مجراهای مختلف قابل محاسبه است. بنابراین داریم

$$u_{\infty} = 2.75 \text{ ms}^{-1} \quad u_{\infty 1} = 0.189 \text{ ms}^{-1} \quad u_{\infty 2} = 0.155 \text{ ms}^{-1}$$



شکل ۵. نمای برش خورده‌ی محفظه‌ی شتاب‌دهنده پس از شبیه‌سازی حالت اول.

20°C استفاده شد. پس از تنظیم ورودی‌های لازم، شبیه‌سازی برای دو حالت با و بدون خنک‌کننده‌ی آب به انجام رسید.



شکل ۴. شبکه‌بندی مورد استفاده برای مدل‌سازی محفظه‌ی شتاب‌دهنده با استفاده از نرم‌افزار ANSYS 12.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و مکانیکی فولاد کربن A 516 [۹]

مقدار (نوع ۷۰)	مشخصه
۷.۸	چگالی (ρ , kg dm^{-3})
۲۱۰	ضریب کشسانی (E, GPa)
۱۲	ضریب انبساط گرمایی (α , $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
۵۵	ضریب رسانای گرمایی (λ , $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$)
۴۶۰	ضریب گرمایی (c, $\text{J/kg}^{\circ}\text{C}$)
۰.۱۸	مقاومت الکتریکی (ρ , $\Omega\mu\text{m}$)
۴۸۵-۶۲۰	مقاومت کششی (MPa)
۲۶۰	تنش تسلیم (MPa)
۲۱	افزایش طول در ۵۰ میلی‌متر (%)

جدول ۲. مشخصات فیزیکی و مکانیکی فولاد زنگ نزن SS 304 [۱۰]

مقدار (304L)	مشخصه
۸.۰۳	چگالی (ρ , kg dm^{-3})
۱۹۲	ضریب کشسانی (E, GPa)
۱۶.۹	ضریب انبساط گرمایی (α , $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)
۱۶.۲	ضریب رسانای گرمایی (λ , $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$)
۵۰۰	ضریب گرمایی (c, $\text{J/kg}^{\circ}\text{C}$)
۰.۷۲	مقاومت الکتریکی (ρ , $\Omega\mu\text{m}$)
۴۸۵	مقاومت کششی (MPa)
۱۷۰	تنش تسلیم (MPa)
۴۰	افزایش طول در ۵۰ میلی‌متر (%)



۳.۴ شبیه‌سازی ترموهیدرولیک محفظه‌ی شتاب‌دهنده بدون گرفتگی مجراها

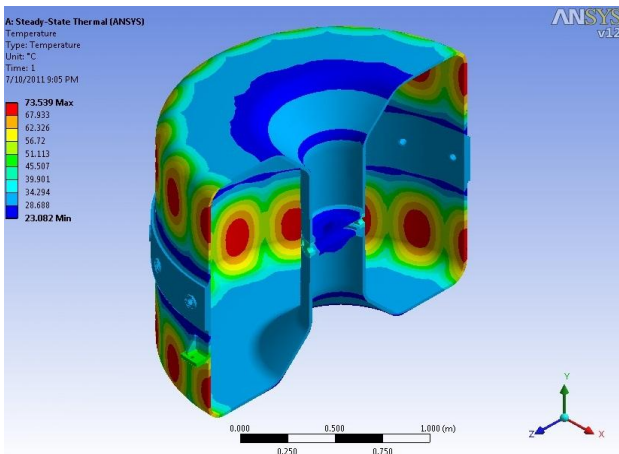
شکل ۶ نمای برش خورده‌ی محفظه‌ی شتاب‌دهنده را پس از شبیه‌سازی نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۶ حداکثر دمای حاصل از شار گرمایی با توان ۷۲kW همراه با خنک‌سازی با آب برابر با ۷۴,۳°C است که در قسمتی از بدنه‌ی محفظه‌ی شتاب‌دهنده (بخش مرکزی دو مجرای آب) اتفاق می‌افتد. در جدول ۳ و شکل ۷ رابطه بین دمای محفظه‌ی شتاب‌دهنده و توان اتلافی داده شده است.

۴.۴ شبیه‌سازی ترموهیدرولیک محفظه‌ی شتاب‌دهنده همراه با گرفتگی مجراها

در این قسمت تحلیل گرفتگی احتمالی مجراها با در نظر گرفتن چندین حالت گرفتگی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. نتایج این مطالعه در جدول ۴ و شکل ۸ ارایه شده است.

۵. اندازه‌گیری دمای دیواره‌ی محفظه‌ی شتاب‌دهنده

برای راستی آزمایی نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی نرم‌افزار ANSYS 12، با نصب ترموکوپل‌های نوع PT100 بر روی ۶ نقطه از نیمه‌ی بالایی و ۳ نقطه از نیمه‌ی پایینی محفظه‌ی شتاب‌دهنده دماهای نهایی حین کارکرد دستگاه ثبت شدند. در شکل ۹ محل نصب ترموکوپل‌ها بر روی دیواره‌ی محفظه شتاب‌دهنده نشان داده شده است. در جدول ۵ و شکل ۱۰ نتایج حاصل از ثبت داده‌ها به وسیله‌ی ترموکوپل‌ها و نتایج شبیه‌سازی مقایسه شده‌اند.



شکل ۶. نمای برش خورده‌ی محفظه‌ی پس از شبیه‌سازی حالت دوم.

از معادله‌های (۲) و (۳) برای بخش اول (قسمت میانی محفظه‌ی شتاب‌دهنده)، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری محاسبه شد

$$Re_{f1} = \frac{\rho_f u_{\infty} d}{\mu_f} = \frac{997,58 \times 0,189 \times 0,383}{1,0004 \times 10^{-3}} = 7218,29$$

$$Nu_f = 0,23 Re_f^{0,8} Pr_f^{0,4} = 0,23 \times 7218,29^{0,8} \times 6,94^{0,4} = 60,96$$

$$Nu_f = \frac{hd}{k_f}$$

$$h = \frac{Nu_f k_f}{d} = \frac{60,96 \times 0,603}{0,383} = 95,97 \text{ W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

مقدار ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری متوسط برای بخش میانی محفظه‌ی شتاب‌دهنده برابر با $96 \text{ W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ در نظر گرفته شد.

از معادله‌های (۲)، (۳) و (۴) برای بخش دوم (بدنه‌ی محفظه‌ی شتاب‌دهنده)، ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری محاسبه شد. لازم به توضیح است که روی بدنه‌ی هر نیمه از محفظه‌ی شتاب‌دهنده، ۱۸ مجرای آب برای خنک‌سازی وجود دارد.

$$D_H = \frac{4A}{P} = \frac{4(0,31 \times 0,32)}{2(0,31 + 0,32)} = 0,315 \text{ m}$$

$$Re_{f2} = \frac{\rho_f u_{\infty} D_H}{\mu_f} = \frac{997,58 \times 0,155 \times 0,315}{1,0004 \times 10^{-3}} = 4868,74$$

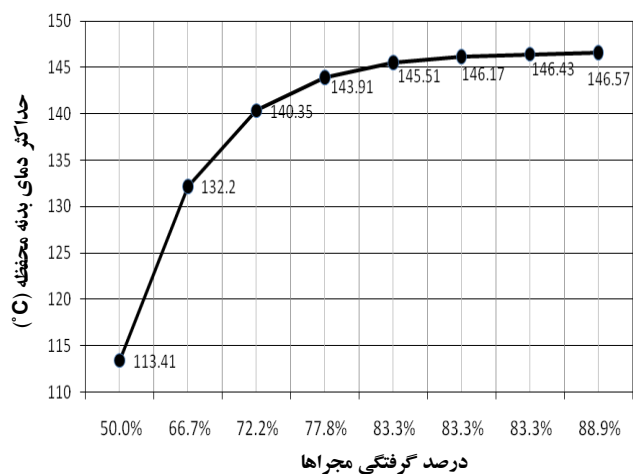
$$Nu_f = 0,23 Re_f^{0,8} Pr_f^{0,4} = 0,23 \times 4868,74^{0,8} \times 6,94^{0,4} = 44,48$$

$$Nu_f = \frac{hd}{k_f} \Rightarrow$$

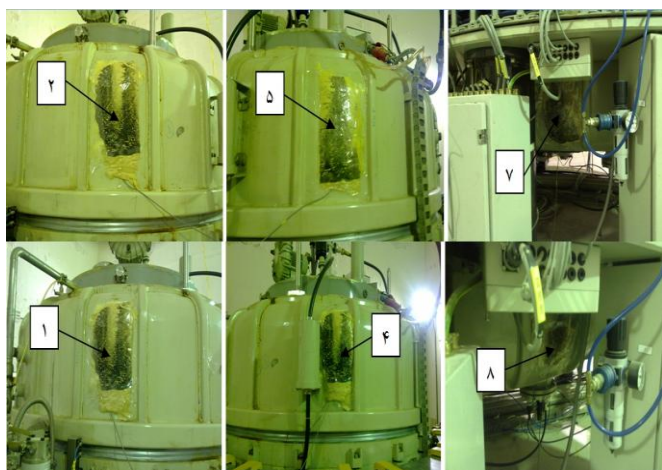
$$h = \frac{Nu_f k_f}{d} = \frac{44,48 \times 0,603}{0,315} = 851,55 \text{ W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

مقدار ضریب جابه‌جایی اجباری متوسط برای بدنه‌ی محفظه‌ی شتاب‌دهنده برابر با $851 \text{ W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ در نظر گرفته شد.

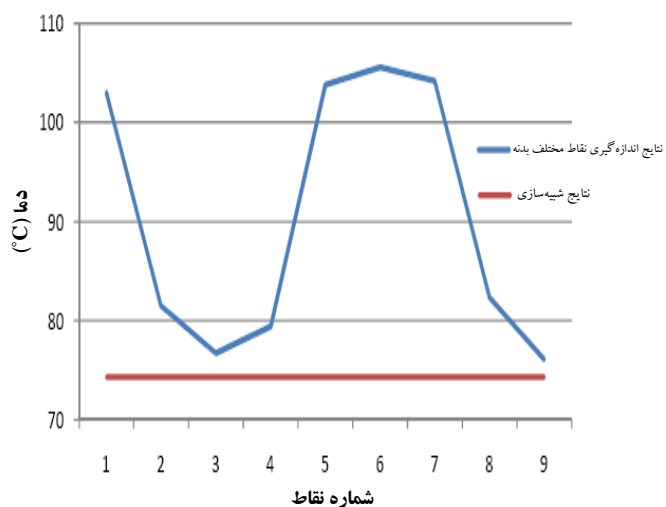
لازم به توضیح است که تحلیل خنک‌سازی با آب برای حالتی که بخشی از مجراها ممکن است به علت رسوب‌های موجود در آب دچار گرفتگی شده باشند نیز مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۸. رابطه بین حداکثر دمای بدنه‌ی محفظه و درصد گرفتگی مجراها مطابق با جدول ۴.



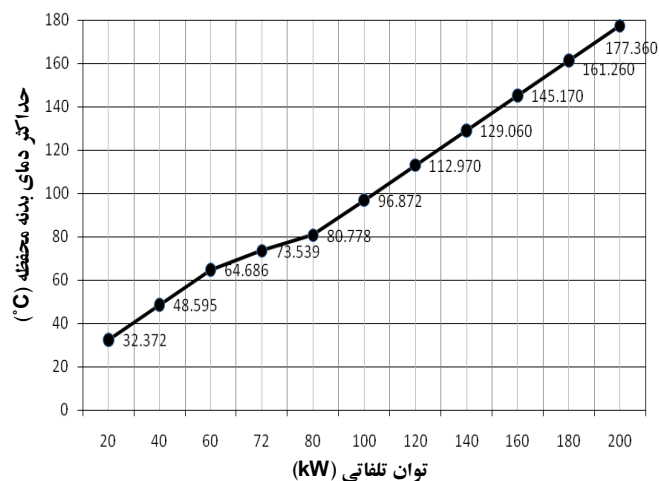
شکل ۹. محل نصب ترموکوپل‌ها بر روی محفظه‌ی شتاب‌دهنده (شماره ترموکوپل‌ها بر روی شکل مشخص شده است).



شکل ۱۰. مقایسه‌ی نتایج حاصل از ثبت داده‌ها به وسیله‌ی ترموکوپل‌ها و نتایج شبیه‌سازی.

جدول ۳. رابطه بین دمای بدنه‌ی محفظه‌ی شتاب‌دهنده و توان اتلافی

ردیف	توان اتلافی (kW)	حداکثر دمای بدنه‌ی محفظه (°C)
۱	۲۰	۳۴٫۹
۲	۴۰	۴۸٫۵
۳	۶۰	۶۴٫۴
۴	۷۲	۷۴٫۳
۵	۸۰	۸۰٫۷
۶	۱۰۰	۹۶٫۸
۷	۱۲۰	۱۱۲٫۹
۸	۱۴۰	۱۲۹
۹	۱۶۰	۱۴۵٫۱
۱۰	۱۸۰	۱۶۱٫۲
۱۱	۲۰۰	۱۷۷٫۳



شکل ۷. رابطه بین دمای بدنه‌ی محفظه و توان اتلافی.

جدول ۴. نتایج شبیه‌سازی محفظه‌ی شتاب‌دهنده در حالت‌های مختلف گرفتگی مجراها.

ردیف	نوع گرفتگی	درصد گرفتگی	تعداد مجراهای باز	حداکثر دمای بدنه‌ی محفظه (°C)
۱	یک در میان	۵۰	۱۸	۱۲۲٫۳
۲	یکی از هر سه	۶۶٫۷	۱۲	۱۴۷٫۶
۳	یکی از هر چهار	۷۲٫۲	۱۰	۱۵۹٫۵
۴	یکی از هر پنج	۷۷٫۸	۸	۱۶۵٫۱
۵	یکی از هر شش	۸۳٫۳	۶	۱۶۷٫۷
۶	یکی از هر هفت	۸۳٫۳	۶	۱۶۸٫۹
۷	یکی از هر هشت	۸۳٫۳	۶	۱۶۹٫۴
۸	یکی از هر نه	۸۸٫۹	۴	۱۶۹٫۶
۹	کل مجراهای نیمه‌ی بالایی	۵۰	۱۸	۲۱۱٫۲
۱۰	کل مجراهای نیمه‌ی پایینی	۵۰	۱۸	۲۱۳٫۳

**جدول ۵.** نتایج حاصل از ثبت داده‌ها به وسیله‌ی ترموکوپل‌ها و مقایسه‌ی آن‌ها با نتایج شبیه‌سازی

نیمه‌ی پایینی محفظه‌ی شتاب‌دهنده										نوع داده
شماره‌ی ترموکوپل										
۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱		
۷۶٫۱	۸۲٫۳	۱۰۴٫۲	۱۰۵٫۶	۱۰۳٫۸	۷۹٫۴	۷۶٫۷	۸۱٫۵	۱۰۳	آزمایش عملی (°C)	
۷۴٫۳	۷۴٫۳	۷۴٫۳	۷۴٫۳	۷۴٫۳	۷۴٫۳	۷۴٫۳	۷۴٫۳	۷۴٫۳	تحلیل با نرم‌افزار (°C)	

منابع:

1. J. Pottier, A new type of RF electron accelerator: the Rhodotron, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 40/41 (1989) 943-945.
2. J.M. Bassaler, J.M. Capdevila, O. Gal, F. Laine, A. Nguyen, J.P. Nicolaj, K. Umiastowski, Rhodotron an accelerator for industrial irradiation, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B68 (1992) 92-95.
3. Y. Jongen, M. Abs, J.M. Capdevila, D. Defries, F. Genin, A. Nguyen, The Rhodotron, a 10 MeV, 100Kw beam power metric waves, CW electron accelerator, presented at the 7th All-Union Conference on applied accelerators, June 16-18, St Petersburg (CIS) (1992).
4. Y. Jongen, M. Abs, F. Genin, A. Nguyen, J.M. Capdevila, D. Defries, The Rhodotron, a new 10MeV, 100Kw, CW metric wave electron accelerator, presented at the International conference on the application of accelerators in research and industry, November 2-5 (1992) Denton (USA).
5. S. Humphries, Principles of charged particle accelerator, John Wiley and Sons (1986).
6. S. Humphries, Charged particle beams, John Wiley and Sons (2002).
7. J.P. Holman, Heat transfer, Tenth Edition, McGraw-Hill (2009).
8. S.W. Churchill and S.W.H. Ozee, Correlation for laminar forced convection in flow over an isothermal flat plate and in developing and fully developed flow in an isothermal tube, Journal of Heat Transfer (95) (1973).
9. ASTM A 516/A 516M-04, Standard specification for pressure vessel plates, Carbon steel, for moderate- and lower-temperature service, American society for testing and materials standards (2004).
10. ASTM A 666-03, Standard specification for annealed or cold-worked austenitic stainless steel sheet, strip, plate, and flat bar, American Society for Testing and Materials Standards (2004).

۶. نتیجه‌گیری

تحلیل ترموهیدرولیکی محفظه‌ی شتاب‌دهنده‌ی رودوترون با استفاده از نرم‌افزار ANSYS 12 در شرایط کاری انجام گرفت. شبیه‌سازی، حداکثر دمای دیواره‌ی محفظه‌ی شتاب‌دهنده با خنک‌سازی هوا و آب را به ترتیب، 663.1°C و 74.3°C را پیش‌بینی نمود. دمای متوسط محفظه (محل‌های بدون گرفتگی) در شرایط کاری حدود 79.3°C در نیمه‌ی بالایی و 79.2°C در نیمه‌ی پایینی اندازه‌گیری شد. از مقایسه‌ی نتایج محاسبه و اندازه‌گیری عملی مشاهده شد که شبیه‌سازی حرارتی محفظه‌ی شتاب‌دهنده از دقت مناسب برخوردار است و نتایج آن می‌تواند در طراحی سیستم خنک‌کننده‌ی شتاب‌دهنده مورد استفاده قرار گیرد. علت تفاوت جزئی (کم‌تر از 5°C) دمای پیش‌بینی شده با دمای اندازه‌گیری شده‌ی بدنه‌ی محفظه‌ی شتاب‌دهنده را می‌توان با اختلاف ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی اجباری و گرفتگی احتمالی مجراها تفسیر نمود. هم‌چنین از مقایسه‌ی نتایج تحلیلی و تجربی نقاط مختلف در نیمه‌ی بالایی و نیمه‌ی پایینی محفظه‌ی شتاب‌دهنده (دماهای بدنه بالاتر از 100°C) می‌توان نتیجه گرفت که این مجراها کم‌تر از ۵۰٪ گرفتگی دارند که در دراز مدت می‌تواند موجب کاهش کارایی شتاب‌دهنده شود. خصوصاً این که افزایش دما باعث تغییر در ابعاد محفظه‌ی شتاب‌دهنده‌ی به ویژه قطر آن، که در کارایی سیستم نقش به‌سزا و تعیین‌کننده‌ای دارد، شده است.

تقدیر و قدردانی

بدین‌وسیله از کلیه‌ی همکاران در پژوهشکده کاربرد پرتوها (یزد) به ویژه جناب آقای مهندس حاصل‌طلب به دلیل همیاری و همکاری در انجام اندازه‌گیری‌ها تشکر و قدردانی می‌شود.

پی‌نوشت‌ها:

۱. Electron Gun
۲. Beam Line
۳. Forced Convection
۴. Steady-State Thermal
۵. Stagnant Air-Simplified Case

