



مدل محاسباتی رفتار گذرای تنظیم‌گر فشار در رآکتورهای آب سبک تحت فشار

مهربان موبد*، احمد حسینی غفار

شرکت طراحی و مهندسی شبیه‌سازهای صنعتی ایران (ادیس)، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران - ایران

چکیده: در رآکتورهای آب سبک تحت فشار، تنظیم‌گر وظیفه‌ی تنظیم فشار مدار اولیه را به عهده دارد. این تجهیز از نقش بسیار مهمی در ایمنی رآکتور برخوردار است. در این مقاله رفتار پویای تنظیم‌گر فشار در شرایط گذرا مدل‌سازی شد. در این مدل محاسباتی، تنظیم‌گر فشار به سه ناحیه‌ی مختلف تقسیم شد. این نواحی شامل ناحیه‌ی بخار، ناحیه‌ی آب اشباع در تماس با بخار و ناحیه‌ی که در آن آب ورودی با آب داخل تنظیم‌گر فشار مخلوط می‌شود، است. در این مدل‌سازی پدیده‌های انتقال مانند چگالش بخار روی دیواره، چگالش بخار بر اثر اسپری آب سرد، تبخیر و جوش حجمی سیال و هم‌چنین جذب انرژی از طریق گرم‌کن‌ها و تبادل انرژی از طریق دیواره با محیط خارج در نظر گرفته شده و با استفاده از معادله‌های پایستگی جرم و انرژی و معادله‌ی حالت، فشار، سطح آب و دمای هر یک از نواحی محاسبه شد. مدل محاسباتی به صورت یک بسته نرم‌افزاری تهیه شد که توانست شبیه‌سازی تمامی فرایندهایی که در یک تنظیم‌گر فشار می‌تواند رخ دهد را به سهولت انجام دهد. با استفاده از این نرم‌افزار می‌توان فرایندهایی شامل روشن و خاموش کردن گرم‌کن‌ها، اسپری نمودن آب، تزریق و تخلیه‌ی آب و هم‌چنین باز کردن شیر اضطراری تخلیه‌ی بخار برای کاهش فشار را به صورت دستی و یا از طریق سناریوهای از پیش تعیین شده انجام داد. از نتایج آزمایش‌های انجام شده در دانشگاه MIT بر روی یک تنظیم‌گر فشار در فرایندهای تزریق آب، تخلیه‌ی آب، تخلیه پس از تزریق آب، برای اعتبارسنجی مدل محاسباتی استفاده شد.

کلیدواژه‌ها: شبیه‌سازی، تنظیم‌گر فشار، مدل‌سازی، رفتار گذرا، رآکتورهای آب سبک

Computational Transient Model of a Pressurizer in Light Water PWR

M. Moubed*, A. Hossini Ghafar

Engineering and Design of Industrial Simulations, AEOI, P.O.Box: 14155-1339, Tehran - Iran

Abstract: The pressurizer component controls and maintains the pressure within the primary loop in Pressurized Water Reactor (PWR). It plays a vital role in the safe operation of PWRs. In this paper, the dynamic behavior of a pressurizer in transient condition is simulated. A numerical model based on three control volumes is considered to simulate the behavior of the pressurizer in transient condition. These three areas include the vapor region, saturated water in contact with vapor region and the region where the surged water is mixed with the water within the pressurizer. In the developed model, wall condensation, spray condensation, evaporation, bulk boiling and the energy absorption through the heater and heat transfer through the wall to ambient phenomena are taken into account. The mass, energy conservation with water-steam state equations are used to calculate the pressurizer pressure, water level and temperatures of each region. The presented model is developed as a software package so as the user can simulate all the available transient with a great ease. Specifically, by using the developed software, heater on/off, spray, in-surge, out-surge and opening of relief valve can be simulated by the user action or through predefined scenarios. The Massachusetts Institute of Technology (MIT) pressurizer test facility experimental data for in-surge, out-surge and out-surge after in-surge transients, are used to validate the developed model.

Keywords: Simulation, Pressurizer, Transient Behavior, PWR

*email: m_moubed@hotmail.com

تاریخ دریافت مقاله: ۹۱/۸/۶ تاریخ پذیرش مقاله: ۹۲/۶/۳۱



۱. مقدمه

در این مقاله از روش مدل‌سازی غیرتعدالی سه ناحیه‌ای تنظیم گر فشار با در نظر گرفتن فرایندهایی نظیر اسپری کردن آب سرد، انتقال حرارت از طریق گرم‌کن‌ها، جوشش حجمی سیال و اثرات چگالش بخار بر روی دیواره با هدایت گذرا استفاده شده است. روش مدل‌سازی ارائه شده نسبت به مدل‌های تعدالی و دو ناحیه‌ای کامل‌تر است و نتایج نتیجه‌های به دست آمده از آن با آزمایش‌های انجام شده در دانشگاه MIT مقایسه شده است. مدل‌سازی انجام شده در این مقاله مشابه کار کیم [۷] است با این تفاوت که روش حل معادله‌ها بهینه‌سازی شده و هدایت دیواره به صورت دو بعدی در نظر گرفته شده است.

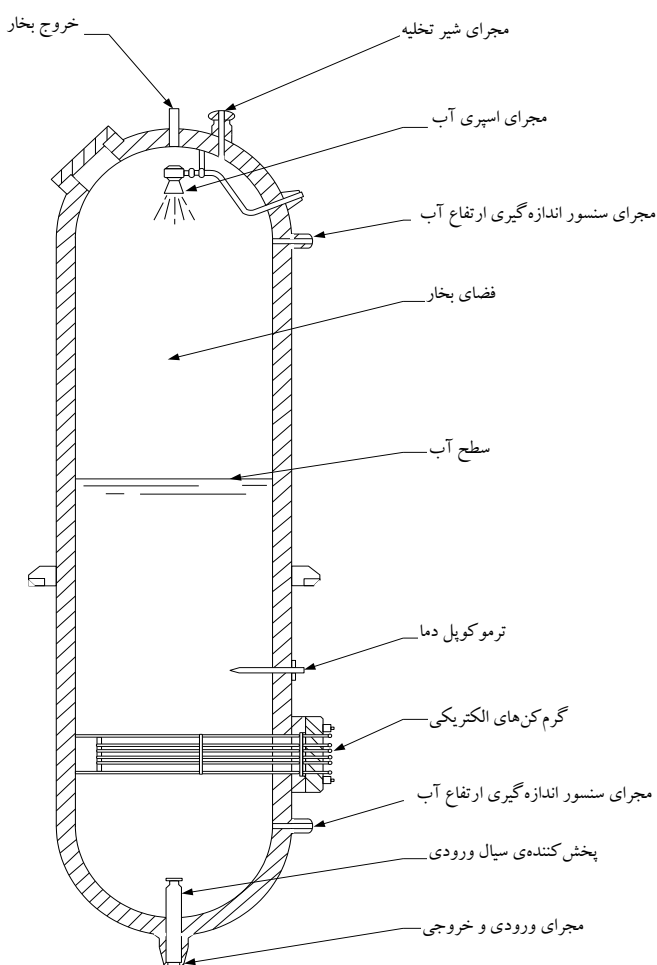
۲. ساختار فیزیکی تنظیم گر فشار

در تنظیم گر فشار، بخار و مایع تحت شرایط اشباع در تعادل‌اند. این وضعیت، فشار مدار اولیه را در محدوده‌ی مجاز نگه می‌دارد. شکل ۱ [۸] ساختار یک تنظیم گر فشار را نشان می‌دهد.

تنظیم گر فشار نقش بسیار مهمی در کارکرد ایمن یک رآکتور آب سبک تحت فشار دارد. از آنجایی که تنظیم گر فشار، فشار مدار اولیه را در محدوده‌ی مجاز تنظیم می‌کند، بررسی رفتار گذرای تنظیم گر فشار از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تنظیم گر فشار از طریق جوشاندن آب به وسیله‌ی گرم‌کن‌ها و یا چگالش بخار با اسپری کردن آب در ناحیه‌ی بخار کنترل می‌شود. برای شبیه‌سازی تنظیم گر فشار باید از مدل‌های غیرتعدالی استفاده کرد. در سال ۱۹۶۷ لئون و کرلین [۱] کد Power train را که در آن از یک مدل تعدالی استفاده شده بود توسعه دادند. بررسی‌های انجام شده نشان داد که این کد در شرایط گذرا با تغییرات سریع، خطای زیادی را در پیش‌بینی رفتار تنظیم گر فشار به وجود می‌آورد. سپس نهاوندی [۲] و بارون [۳] یک مدل غیرتعدالی را ارائه دادند که در آن فرایندهایی نظیر اسپری آب سرد، انتقال حرارت از طریق گرم‌کن‌ها و جوشش حجمی سیال در نظر گرفته شده بود. در این مدل، از فرایندهایی مانند چگالش بخار بر روی دیواره و انتقال حرارت از طریق دیواره و سطح مشترک بخار و آب صرف‌نظر شده و هم‌چنین فرض شده است که آب تزریق^(۱) شده به تنظیم گر فشار پس از ورود، به طور کامل با کل آب داخل تنظیم گر فشار مخلوط می‌شود.

با توجه به این که در پایین تنظیم گر فشار تجهیزاتی برای جلوگیری از فوران و اختلاط شدید آب ورودی تعبیه می‌شود، لذا فرض اختلاط کامل در فرایند تزریق آب می‌تواند باعث ایجاد خطای قابل ملاحظه‌ای در محاسبه‌ی فشار شود. برای رفع این مشکل باید در مدل‌سازی از سه ناحیه - یکی برای بخار و دو ناحیه برای آب - استفاده کرد تا نتایج به واقعیت نزدیک‌تر شود.

بررسی رفتار ترموهیدرولیکی یک تنظیم گر فشار رآکتور آب تحت فشار توسط اولینا تاکاسو [۴] با استفاده از کدهای APROS [۵] و TRACE [۶]، انجام و نتایج محاسبه‌های این کدها با آزمایش‌های انجام شده بر روی یک تنظیم گر فشار آزمایشی در دانشگاه MIT و تنظیم گر فشار Neptunus و PACTEL مقایسه شده است. کیم [۷] مدل‌سازی تنظیم گر فشار آزمایشی دانشگاه MIT را با روش غیرتعدالی و با در نظر گرفتن سه ناحیه انجام داد و نتایج آن را با آزمایش‌های انجام شده بر روی این تنظیم گر فشار مقایسه نمود.



شکل ۱. ساختار تنظیم گر فشار [۸].



۳. پدیده‌های انتقال در تنظیم گر فشار

۱.۳ چگالش روی دیواره‌ی تنظیم گر فشار

در طی فرایند تزریق، به دلیل تراکم ناحیه‌ی بخار، فشار افزایش یافته و دمای بخار بیش‌تر از دمای سطح دیواره می‌شود. این اختلاف دما باعث می‌شود تا بخار بر روی دیواره چگالیده شده و قطره‌های آب تشکیل شوند. گرمای منتقل شده به دیواره‌ی تنظیم گر فشار، تابعی از سطح آن و مقدار ضریب انتقال حرارت بین بخار و دیواره است. با محاسبه‌ی مقدار حرارت منتقل شده از بخار به دیواره‌ی تنظیم گر فشار می‌توان نرخ چگالش را از طریق معادله (۱) به دست آورد [۷]

$$\dot{m}_{wc} = \frac{Q_{wc}}{h_{fg}} \quad (1)$$

که در آن،

$$Q_{wc} = h_s A_s (T_s - T_{iw}) \quad (2)$$

از طرفی کل حرارت منتقل شده به دیواره برای محاسبه‌ی هدایت گذرا برابر است با

$$Q_w = h_1 A_s (T_s - T_{iw}) + h_1 A_1 (T_1 - T_{iw}) \quad (3)$$

محاسبه‌ی مقدار واقعی ضریب انتقال حرارت بین بخار و دیواره نقش بسیار مهمی در درستی رفتار گذرای تنظیم گر فشار دارد. برای اندازه‌گیری این پارامتر، از نظریه‌ی ناسلت در حالت پایدار استفاده شده است (معادله ۴). این معادله برای چگالش لایه‌ای پایدار بر روی صفحه‌ای عمودی که در مجاورت بخار قرار دارد به دست آمده است. در این حالت، بخار مایع شده و یک لایه آب با ضخامت متغیر و متناسب با ارتفاع بر روی دیواره به وجود می‌آید. در این شرایط مقدار ضریب انتقال حرارت به اختلاف دمای بخار و دیواره و هم‌چنین ارتفاع صفحه‌ی چگالش وابسته است

$$h_s = 0.9434 \sqrt{\frac{g \rho \Delta \rho k^2 \hat{h}_{fg}}{L \mu \Delta T}} \quad (4)$$

که در آن Δt اختلاف دمای دیواره و بخار و L ارتفاع صفحه‌ی چگالش است.

از آنجایی که میزان چگالش بخار بر روی دیواره‌ی تنظیم گر فشار در شرایط گذرا در مقایسه با میزان چگالش بخار در حالت پایا متفاوت است، محاسبه‌ی انتقال حرارت از معادله‌ی (۴) نتایج دقیقی را به دست نخواهد داد. در بخش ۷ به این موضوع اشاره شده است. در حال حاضر رابطه‌ی بهتری برای این منظور در دست نیست و اکثر مدل‌سازی‌ها با استفاده از این رابطه انجام شده است. معادله‌ی (۴) در حالت تعادلی که دمای دیواره و بخار با هم برابر هستند، معتبر نیست.

محاسبه‌ی توزیع دمای روی دیواره با حل معادله‌ی هدایت گذرا با استفاده از شرایط مرزی و مقادیر اولیه به دست می‌آید. در این مدل از معادله‌ی هدایت دو بعدی گذرا و توزیع دمای یکنواخت در ناحیه‌ی بخار و محیط خارج تنظیم گر فشار استفاده شده است

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \quad (5)$$

شرایط مرزی در ناحیه‌ی بخار

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_1}^{Z=0 \rightarrow Z_1} = h_1 (T_1 - T_{iw}^Z)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_0}^{Z=0 \rightarrow Z_1} = h_o (T_o - T_{ow}^Z)$$

شرایط مرزی در ناحیه‌ی آب

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_1}^{Z=Z_1 \rightarrow Z_{pr}} = h_s (T_s - T_{iw}^Z)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=r_0}^{Z=Z_1 \rightarrow Z_{pr}} = h_o (T_o - T_{ow}^Z)$$

شرایط مرزی در محل تماس دیواره‌ی عمودی با بخش فوقانی و تحتانی تنظیم گر فشار

$$-k \frac{\partial T}{\partial Z} \Big|_{Z=0} = 0$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial Z} \Big|_{Z=L_{pz}} = 0$$

و شرط اولیه‌ی شروع محاسبه

$$T(r, Z, 0) = T_{init}$$



فشار می‌شود. اسپری کردن، چون با آب سردتر از آب داخل تنظیم گر فشار انجام می‌شود باعث کاهش فشار می‌شود و برای جبران این کاهش از گرم‌کن‌های با انرژی متعادل، به صورت مستمر استفاده می‌شود.

پارامترهای بسیاری از قبیل فشار، دما، کیفیت، اندازه و شکل قطره‌های آب ورودی، بر روی انتقال حرارت بین بخار و اسپری تأثیر می‌گذارند. آزمایش‌های زیادی نشان داده‌اند که قطره‌های آب قبل از رسیدن به سطح آب درون تنظیم گر فشار به حالت اشباع می‌رسند [۷]. با فرض این موضوع می‌توان نرخ چگالش بر اثر اسپری شدن را بدون استفاده از مقدار ضریب انتقال حرارت و تنها با استفاده از موازنه‌ی انرژی لازم برای رسانیدن دمای اسپری شدن آب ورودی به دمای اشباع متناظر با فشار را چنین محاسبه کرد

$$\dot{m}_{cs} = \frac{(\hat{h}_{sat} - \hat{h}_{sp})W_{sp}}{\hat{h}_{fg}} \quad (8)$$

۴.۳ جوشش از طریق گرم‌کن‌ها و دیواره

همان‌گونه که در بخش پیشین ذکر شد، همراه اسپری لازم است مقداری بخار نیز توسط گرم‌کن در سیال ایجاد شود تا فشار در سطح مورد نظر ثابت بماند. عمده‌تاً از چندین گرم‌کن در تنظیم گر فشار استفاده می‌شود و در مواقعی که فشار کم‌تر از حد مجاز می‌شود تعداد بیش‌تری از آن‌ها فعال شده و آب داخل تنظیم گر فشار را بخار می‌کنند. از طرفی در طی فرایند تخلیه که فشار کاهش می‌یابد دمای سطح دیواره می‌تواند بالاتر از دمای قطره‌های سیال چسبیده بر روی دیواره باشد که در این حالت جوشش بر روی دیواره اتفاق می‌افتد. در مجموع نرخ جوشش با توجه به انرژی منتقل شده از طریق گرم‌کن‌ها و دیواره چنین محاسبه می‌شود [۷]

$$Q_{wall} = (\rho C_p V)_{wall} \frac{dT}{dt} \quad (9)$$

$$\dot{m}_b = \frac{Q_{heater} + Q_{wall}}{\hat{h}_{fg}} \quad (10)$$

رفتار گذرای حرارت تولید شده از طریق گرم‌کن‌ها در موقع‌های روشن و خاموش شدن به صورت یک تابع نمایی و با استفاده از یک ثابت زمانی مدل‌سازی شد. در این شرایط توان

در حل معادله‌ی (۵) ابتدا دیواره در امتداد شعاع و ارتفاع شبکه‌بندی می‌شود. در این مدل‌سازی از شبکه‌ی مستطیلی ساخت یافته استفاده شده و روش تفاضل متناهی برای تجزیه‌ی معادله‌ی هدایت به کار گرفته شده است. معادله‌ی حاکم بر هر یک از نقاط محاسباتی وابسته به همسایگان مجاور خود و یا شرط‌های مرزی است. در تجزیه‌ی عامل وابسته به زمان از دو روش ضمنی و صریح [۹] استفاده می‌شود. در روش ضمنی محاسبه‌ی دمای هر یک از نقاط داخل دیواره مستلزم حل هم‌زمان تمامی آن‌ها در یک دستگاه معادله‌های خطی است. در روش صریح که در این مدل‌سازی از آن استفاده شده است، دمای هر نقطه به طور مستقیم از دمای گام زمانی قبل به دست می‌آید.

۲.۳ جوشش حجمی

در کلیه‌ی فرایندهایی که منجر به کاهش فشار می‌شود مانند تخلیه^(۲)ی آب و یا اسپری نمودن آب سرد در صورتی که آب داخل تنظیم گر فشار در دمای اشباع قرار داشته باشد، جوشش خود به خودی یا جوشش حجمی رخ می‌دهد. بخار تولید شده در این فرایند باعث جبران کاهش فشار خواهد شد. نرخ تولید جوشش حجمی با استفاده از قانون پایستگی انرژی (معادله‌ی (۶)) و جابه‌جایی آن از فاز مایع به فاز بخار، از معادله‌ی (۷) محاسبه می‌شود [۷]

$$dE = m_1 C_p dT = dm_{be} \hat{h}_{fg} \quad (6)$$

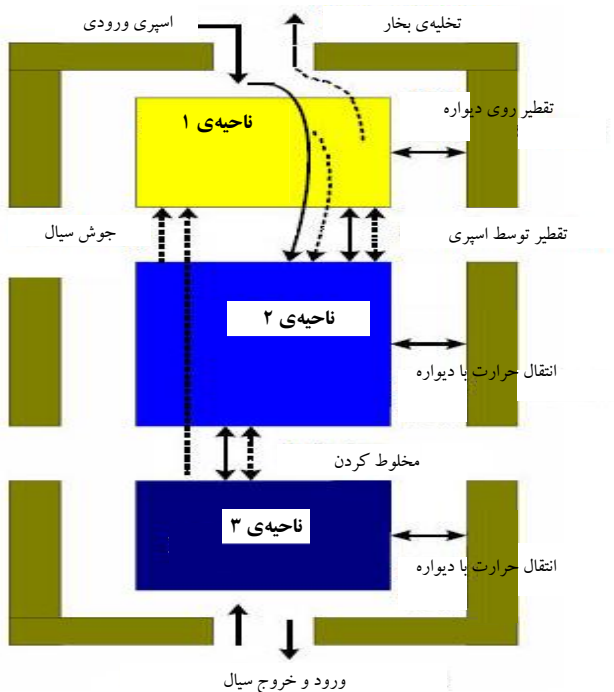
$$\frac{dm_{be}}{dt} = \frac{m_1 C_p}{\hat{h}_{fg}} \frac{dT}{dt} = \frac{A_{pz} L_1 \rho C_p T_{sat} v_{fg}}{\hat{h}_{fg}^2} \frac{dp}{dt} \quad (7)$$

در این معادله‌ها، m_{be} جرم مقدار مایع اشباعی است که با تأخیر باعث تعدیل فشار شده و دمای سیال را به نقطه‌ی اشباع در فشار جدید می‌رساند.

۳.۳ چگالش بر اثر اسپری کردن

در رآکتورها عمده‌تاً جریانی دایمی از شاخه‌ی آب ورودی به رآکتور به صورت اسپری شده وارد تنظیم گر فشار می‌شود. این جریان باعث کاهش تنش‌های حرارتی بر روی دیواره‌ی تنظیم گر

- ناحیه‌ی ۱: بخار
- ناحیه‌ی ۲: قسمتی از آب که در تماس با بخار است.
- ناحیه‌ی ۳: ناحیه‌ای که در فرایند تزریق به وجود می‌آید و در زیر ناحیه‌ی ۲ قرار دارد.
- رفتار غیرتعدالی برای هر یک از این سه ناحیه در نظر گرفته شده است.
- فرض‌های در نظر گرفته شده در مدل به شرح زیر است:
- در هر سه ناحیه فشار با هم برابر است.
- انتالی در داخل هر یک از ناحیه‌ها به صورت یکنواخت است.
- از اثرات زمانی که لازم است تا قطره‌های مایع اسپری شده و بخار چگالیده شده بر روی دیواره به ناحیه‌ی مایع اشباع برسد، صرف نظر شده است.
- قطره‌های مایع اسپری شده و بخار چگالیده شده بر روی دیواره، قبل از ورود به فاز مایع به دمای اشباع می‌رسند.
- در هر گام زمانی، سطح مایع تنظیم گر فشار با توجه به میزان مایع اشباع حاصل از چگالش و اسپری شدن محاسبه می‌شود.
- ناحیه‌ی بخار می‌تواند در بین حالت اشباع تا فوق گرمایش قرار گیرد.
- حجم تنظیم گر فشار ثابت است.
- گاز غیرقابل چگالش در تنظیم گر فشار وجود ندارد.



شکل ۲. ناحیه‌های مدل تنظیم گر فشار.

خروجی گرم کن‌ها باید در هر گام زمانی براساس زمان طی شده از روشن شدن و یا خاموش شدن و با استفاده از توان پیشینه‌ی آن محاسبه شود.

۵.۳ انتقال جرم و حرارت در سطح مشترک آب و بخار

در یک تنظیم گر فشار واقعی تجهیز خاصی برای پخش سیال^(۳) ورودی به منظور کاهش تکانه‌ی (اندازه‌ی حرکت) آب ورودی به طرف بالا تعبیه شده است. بنابراین دهانه‌ی ورودی آب به میزان کمی در لایه‌های فوقانی نفوذ کرده و تنها سیال ناحیه‌ی سوم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در نتیجه آب اشباع سطح فوقانی که در تماس با بخار قرار دارد مانند یک پیستون، بخار را متراکم می‌کند. انتقال حرارت در سطح بخار و آب از طریق دو سازوکار هدایت بدون انتقال جرم و جابه‌جایی همراه با انتقال جرم انجام می‌شود. نرخ انتقال حرارت سطحی بین بخار و آب در مقایسه با چگالش روی دیواره‌ی تنظیم گر فشار و انتقال حرارت با محیط ناچیز است و در این مدل‌سازی از آن صرف نظر شده است. در شرایط غیرتعدالی، سازوکار انتقال جرم بین آب و بخار از طریق فرایندهایی چون جوشش حجمی و چگالش روی دیواره انجام می‌شود که در نهایت منجر به ایجاد یک لایه‌ی اشباع در سطح مشترک آب و بخار شده و از انتقال حرارت بین آب و بخار جلوگیری می‌کند [۷].

۶.۳ انتقال حرارت بین دیواره و آب

چون جرم و ظرفیت گرمایی ویژه‌ی آب بیش‌تر از دیواره‌ی تنظیم گر فشار است، انتقال حرارت بین دیواره و آب تأثیر چندانی بر رفتار تنظیم گر فشار ندارد. با این حال در این مدل‌سازی با احتساب یک مقدار ثابت برای ضریب انتقال حرارت بین آب و دیواره، گرمای جابه‌جا شده بین این دو در نظر گرفته شد

$$Q_{\text{wall}} = \sum_{k=1}^{k=n_L} h_1 A^k (T_1 - T_{iw}^k) \quad (11)$$

۴. فرض‌ها و ویژگی‌های مدل

در این قسمت ویژگی‌های اصلی این مدل‌سازی همراه با فرض‌های به کار رفته در آن به اختصار شرح داده می‌شود [۷].

این ویژگی‌ها عبارت‌اند از:

- حجم تنظیم گر فشار به سه ناحیه (شکل ۲) تقسیم شده است:



با جای گذاری معادله های (۱۷)، (۱۸) و (۱۹) در معادله ی (۱۶) شکل نهایی معادله ی انرژی برای هر یک از نواحی چنین بیان می شود

$$m_i \frac{d\hat{h}_i}{dt} = Q_i + V_i \frac{dP}{dt} + \sum_k \dot{m}_k \hat{h}_k - \dot{m}_i \hat{h}_i \quad (20)$$

در رابطه ی ۲۰ مشتق های زمانی فشار و انتالپی با روش تفاضل متناهی چنین تجزیه می شوند

$$\frac{d\hat{h}}{dt} = \frac{\hat{h}^{n+1} - \hat{h}^n}{\Delta t}$$

$$\frac{dP}{dt} = \frac{P^{n+1} - P^n}{\Delta t} \quad (21)$$

شکل تجزیه شده ی معادله ی انرژی برای هر یک از ناحیه ها این است

$$m_1 \frac{\hat{h}_1^{n+1} - \hat{h}_1^n}{\Delta t} = (\dot{m}_{be\tau} + \dot{m}_{be\tau} + \dot{m}_{ht}) \hat{h}_g - (\dot{m}_{wc} + \dot{m}_{cs}) \hat{h}_1^{n+1}$$

$$+ Q_1 + V_1 \cdot \frac{(P^{iter} - P^n)}{\Delta t} - \dot{m}_1 \hat{h}_1^n \quad (22)$$

$$m_v \frac{\hat{h}_v^{n+1} - \hat{h}_v^n}{\Delta t} = (\dot{m}_{wc} + \dot{m}_{sp} + \dot{m}_{cs}) \hat{h}_f - (\dot{m}_{be\tau} + \dot{m}_{ht}) \hat{h}_v^{n+1}$$

$$+ Q_v + V_v \cdot \frac{(P^{iter} - P^n)}{\Delta t} - \dot{m}_v \hat{h}_v^n \quad (23)$$

$$m_r \frac{\hat{h}_r^{n+1} - \hat{h}_r^n}{\Delta t} = (\dot{m}_{sui} \hat{h}_{sui} - \dot{m}_{suo} \hat{h}_r^{n+1}) - (\dot{m}_{be\tau} \hat{h}_r^{n+1})$$

$$+ Q_r + V_r \cdot \frac{(P^{iter} - P^n)}{\Delta t} - \dot{m}_r \hat{h}_r^n \quad (24)$$

با استفاده از فرض ثابت بودن حجم تنظیم گر فشار می توان رابطه ای بین انتالپی و چگالی هر یک از ناحیه ها را بر حسب فشار چنین به دست آورد

$$\sum_{i=1}^r V_i = cte \rightarrow \frac{dV_{total}}{dt} = 0$$

$$\rightarrow \sum_{i=1}^r \left(\frac{\dot{m}_i}{\rho_i} + M_i \frac{d\rho_i(P, \hat{h})}{dt} \right) = 0$$

$$\rightarrow \sum_{i=1}^r \left(\frac{\dot{m}_i}{\rho_i} + M_i \left(\frac{\partial \rho_i}{\partial P} \frac{dP}{dt} + \frac{\partial \rho_i}{\partial \hat{h}_i} \frac{d\hat{h}_i}{dt} \right) \right) = 0 \quad (25)$$

۵. معادله های حاکم بر تنظیم گر فشار

در این مدل سازی برای محاسبه ی فشار، دما و ارتفاع آب در تنظیم گر فشار از معادله های پایستگی جرم و انرژی در حجم ثابت استفاده شده است [۷].

معادله ی پایستگی جرم برای هر یک از ناحیه های تنظیم گر فشار چنین بیان می شود

$$\frac{dm_i}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} \quad i = 1, 2, 3 \quad (12)$$

بر اساس فرایندهایی که در هر ناحیه اتفاق می افتد معادله ی پایستگی جرم برای هر ناحیه چنین به دست می آید

$$\frac{dm_1}{dt} = (\dot{m}_{be\tau} + \dot{m}_{be\tau} + \dot{m}_{ht}) - (\dot{m}_{wc} + \dot{m}_{cs}) \quad (13)$$

$$\frac{dm_v}{dt} = (\dot{m}_{wc} + \dot{m}_{sp} + \dot{m}_{cs}) - \dot{m}_{be\tau} - \dot{m}_{ht} \quad (14)$$

$$\frac{dm_r}{dt} = (\dot{m}_{sui} - \dot{m}_{suo}) - \dot{m}_{be\tau} \quad (15)$$

معادله ی پایستگی انرژی برای هر یک از ناحیه ها چنین بیان می شود

$$\frac{dE_i}{dt} = Q_i - W_i^{Work} + \sum \dot{m}_{in} \hat{h}_{in} - \sum \dot{m}_{out} \hat{h}_{out} \quad i = 1, 2, 3 \quad (16)$$

کار فشار بر روی هر یک از ناحیه ها چنین به دست می آید

$$W_i^{Work} = P \frac{dV_i}{dt} \quad (17)$$

با توجه به معادله ی حالت می توان انرژی کل یک سیستم را بر حسب انتالپی بیان کرد

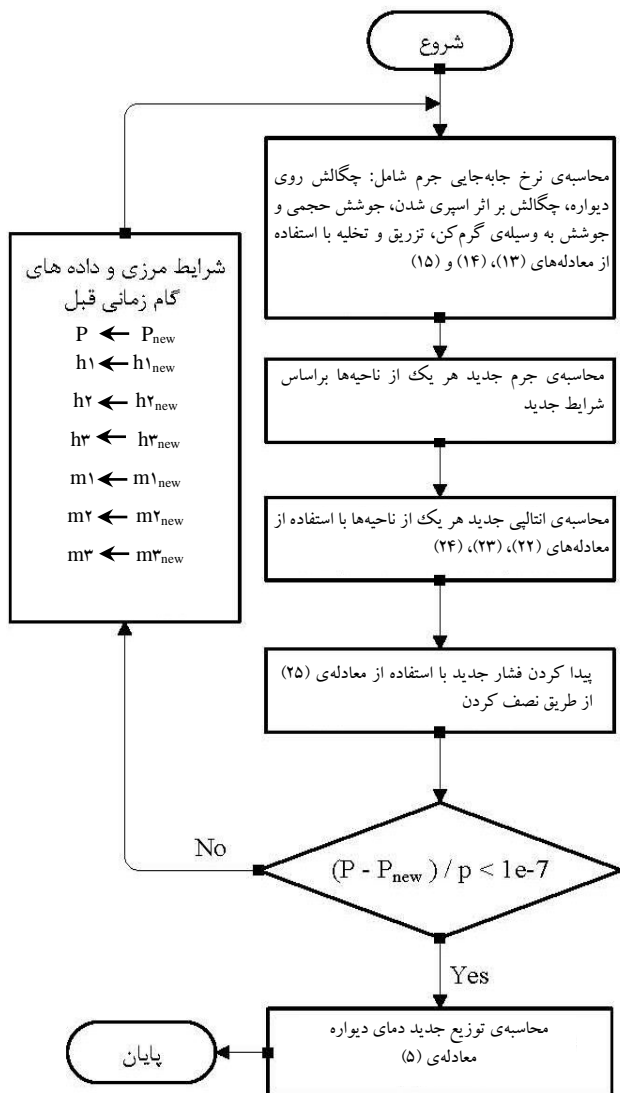
$$\frac{dE_i}{dt} = \frac{dH_i}{dt} - \frac{d(PV_i)}{dt} \quad (18)$$

$$\frac{dH_i}{dt} = \frac{d(m_i \hat{h}_i)}{dt} = m_i \frac{d\hat{h}_i}{dt} + \hat{h}_i \frac{dm_i}{dt} \quad (19)$$

جرم و انتالی با فشار جدید مجدداً ادامه یابد. آزمایش‌های شرایط مختلف نشان داد که این روش از پایداری بالایی برخوردار است و در حل معادله‌ها همواره همگرایی وجود خواهد داشت.

در پایان هر گام زمانی محاسبه چنانچه ضریب کیفیت ناحیه‌ی بخار کم‌تر از یک بود (قطره‌های مایع در بخار ظاهر می‌شد) لازم بود جرم مایع درون آن جدا و به فاز مایع منتقل شود تا بخار به حالت اشباع برگردد. به همین صورت اگر ناحیه‌های دوم و سوم «دو فاز» بودند باید بخار موجود در آن‌ها به ناحیه یک منتقل می‌شد تا به حالت مایع اشباع برسند.

لازم به ذکر است که خواص ترمودینامیکی آب و بخار در شرایط مختلف از کتاب‌خانه‌ی XSTEAM [۱۰] محاسبه شد. روندنمای روش حل در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۳. روندنمای روش حل.

معادله‌ی (۲۵)، یک رابطه‌ی مستقل بین فشار و انتالی هر یک از ناحیه‌ها برقرار می‌کند. با استفاده از این معادله و سه معادله‌ی جرم (۱۳)، (۱۴)، (۱۵) و سه معادله‌ی انرژی (۲۲)، (۲۳)، (۲۴) برای هر یک از ناحیه‌ها می‌توان پارامترهای $(P, \hat{h}_1, \hat{h}_2, \hat{h}_3)$ را به دست آورد.

۶. روش حل

قبل از شروع محاسبه‌ها، دمای دیواره، جرم و انتالی ناحیه‌ها براساس فشار اولیه و دیگر شرایط مرزی تعیین شد. سپس با استفاده از مقادیر اولیه‌ی فشار و انتالی هر یک از ناحیه‌ها و فرایندهایی مانند اسپری شدن آب سرد، تزریق، تخلیه، انتقال حرارت از طریق گرم‌کن‌ها، جوشش حجمی سیال و اثرهای چگالش بخار بر روی دیواره، نرخ جابه‌جایی جرم در هر ناحیه محاسبه شد (معادله‌های ۱۳ الی ۱۵). براساس نرخ جابه‌جایی به دست آمده، جرم جدید هر ناحیه محاسبه شد. در این مرحله، قانون پایستگی انرژی با قید ثابت ماندن حجم از طریق معادله‌های ۲۲ الی ۲۵ بر روی سه ناحیه اعمال شد. انجام این کار مستلزم حل هم‌زمان این چهار دسته معادله در یک دستگاه معادله‌ها بود. در این روش، مقدارهای $\frac{\partial P}{\partial h}$ و $\frac{\partial P}{\partial P}$ که به طور صریح در کتاب‌خانه‌ی خواص آب موجود نبود، در فشار و انتالی مورد نظر محاسبه شدند. وابستگی شیب تغییرات چگالی بر حسب فشار و انتالی به حالت سیال و شرایط ترمودینامیکی آن باعث شد در برخی شرایط معادله‌ها واگرا شود. برای رفع این مشکل روش جدیدی در این مدل‌سازی ارائه شد.

در این روش جدید ابتدا قانون پایستگی انرژی به وسیله‌ی رابطه‌های ۲۲ الی ۲۴ بر روی ناحیه‌ها اعمال و انتالی جدید هر ناحیه محاسبه شد. سپس با مشخص بودن جرم و انتالی هر ناحیه، فشاری که در آن می‌شد جرم هر سه ناحیه را در تنظیم‌گر فشار جای داد با روش سعی و خطا به دست آمد (در این مدل‌سازی از روش «نصف کردن» برای محاسبه‌ی فشار استفاده شد).

چنانچه فشار به دست آمده در این مرحله با فشار تکرار قبل تفاوتی کم‌تر از خطای مورد انتظار داشت شرایط جدید ترمودینامیکی هر ناحیه محاسبه می‌شد و در غیر این صورت لازم بود با فشار به دست آمده از این تکرار روند محاسبه‌ی جابه‌جایی



۷. بحث و نتایج

در طی سال‌های ۱۹۸۳ تا ۱۹۸۴ مجموعه‌ای از آزمایش‌ها در بخش مهندسی هسته‌ای دانشگاه MIT بر روی یک تنظیم گر فشار آزمایشگاهی انجام شد. این آزمایش‌ها شامل تزریق، تخلیه و تزریق - تخلیه بودند. شکل ۴ طرح‌واره‌ی این تأسیسات را نشان می‌دهد [۴]. مشخصات فنی این تنظیم گر فشار چنین است

- ارتفاع تنظیم گر فشار ۱٫۱۴۳m؛
- قطر داخلی ۰٫۲۰۳m؛
- ضخامت دیواره‌ی آن ۹٫۵mm.

از نتایج به دست آمده در این آزمایش‌ها برای اعتبارسنجی مدل ارائه شده استفاده شد.

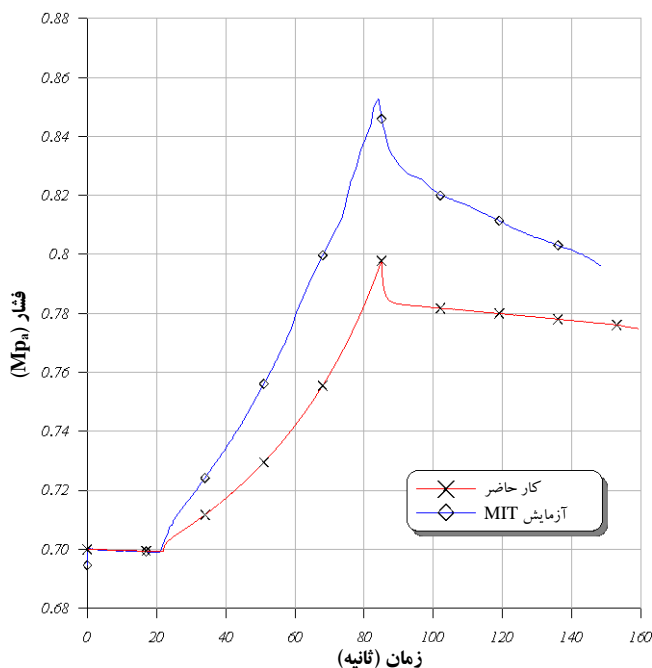
۱.۷ تزریق

در این آزمایش تنظیم گر فشار ابتدا تا ارتفاع ۰٫۳۵m با آب پر شده و در فشار ۶٫۹bar در حال تعادل بود. سپس آب ۲۴°C با نرخ جریان ۰٫۲۵kg/s از طریق نازل پایین به تنظیم گر فشار تزریق شد. تزریق از ثانیه ۲۲ شروع شد و به مدت ۶۳ ثانیه ادامه یافت و تغییرات فشار در طول این فرایند اندازه‌گیری شد.

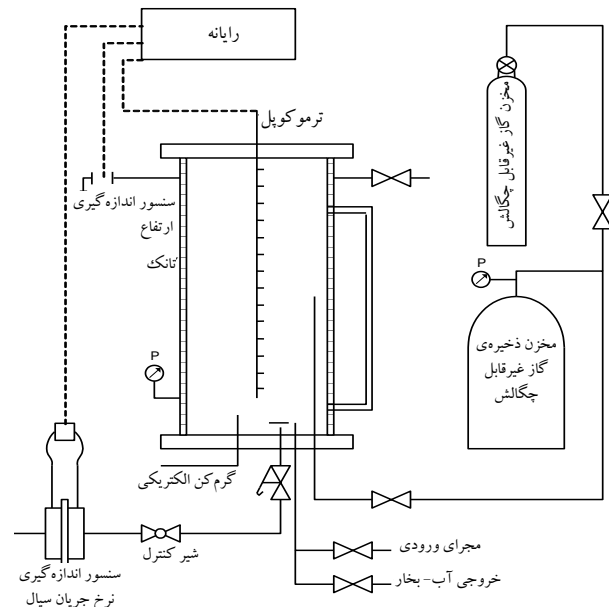
آزمایش‌های MIT نشان داد که در طی تزریق آب، درون تنظیم گر فشار به دو ناحیه‌ی آب گرم و سرد تفکیک می‌شود. در این فرایند چگالش بخار بر روی دیواره پدیده‌ی غالب بر رفتار تنظیم گر فشار بود [۴].

در طول این فرایند آب به صورت یک پیستون بالا آمده و بخار را متراکم نمود. این عمل باعث افزایش فشار و دمای بخار شد. دمای دیواره‌ی تنظیم گر فشار برحسب ضریب نفوذ حرارتی به کندی به این تغییرات پاسخ داده و همواره دمایی کم‌تر از دمای بخار داشت. اختلاف دمای بخار و دیواره باعث چگالش بخار روی دیواره و افزایش دمای دیواره شد. در حدود چند ثانیه پس از پایان تزریق با نفوذ حرارت به سطح داخلی دیواره‌ی تنظیم گر فشار شیب کاهش فشار کم شد. از این پس با دفع حرارت به محیط از طریق هدایت دیواره و جابه‌جایی با محیط خارج، فشار با شیب کم‌تری کاهش یافت.

در شکل ۵ نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی حاضر با نتایج آزمایش‌های MIT مقایسه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، فشار حداکثر پیش‌بینی شده به وسیله‌ی مدل کم‌تر از نتایج آزمایش‌های MIT است. دلیل اختلاف بین بیشینه مقدار فشار به دست آمده از این مدل و آزمایش‌های MIT، همان‌طور که در بخش ۱.۳ توضیح داده شد، ناشی از استفاده از ضریب انتقال حرارت چگالش در حالت پایدار است. لازم به ذکر است در طول تزریق، ضریب انتقال حرارت چگالش به دلیل فرایندهای گذرا تغییر می‌کند. با این حال رفتار نمودار با نتایج آزمایش تطابق خوبی را نشان می‌دهد.



شکل ۵. تغییرات فشار در فرایند تزریق.



شکل ۴. طرح‌واره‌ی تأسیسات تنظیم گر فشار MIT [۴].

۲.۷ تخلیه

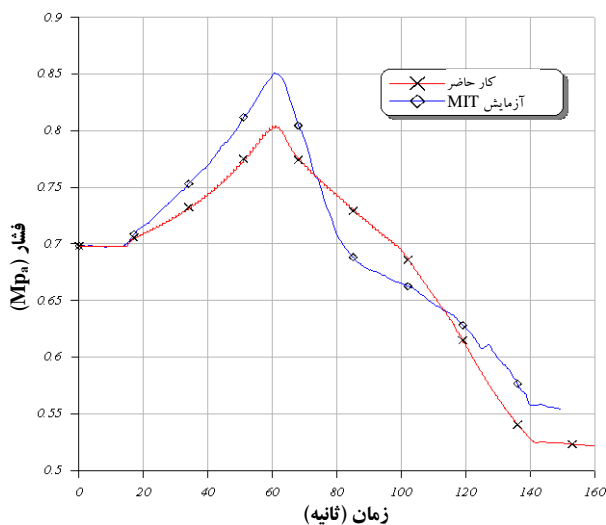
در این آزمایش تنظیم‌گر فشار ابتدا تا ارتفاع $0.75m$ با آب پر شده و در فشار $8.65bar$ در حال تعادل بود. سپس آب از طریق نازل پایین با نرخ جریان $0.35kg/s$ از تنظیم‌گر فشار تخلیه شد. تخلیه از ثانیه‌ی ۶ شروع شد و به مدت ۵۳ ثانیه ادامه یافت و تغییرات فشار در طول این فرایند اندازه‌گیری شد.

تخلیه‌ی آب منجر به افزایش حجم ناحیه‌ی بخار و کاهش فشار در تنظیم‌گر فشار شد. با توجه به این که دمای سیال در طول تخلیه همواره بیش‌تر از دمای مایع اشباع در فشار متناظر با آن بود، پدیده‌ی جوشش حجمی در فاز مایع رخ داد. از طرفی دیواره‌ی تنظیم‌گر فشار دمایی بالاتر از دمای بخار داشت و گرما از طرف دیواره به تنظیم‌گر فشار منتقل می‌شد. در پایان تزریق که فرایند جوشش حجمی متوقف شد، انرژی حرارتی ذخیره شده در دیواره به سیال چسبیده به دیواره منتقل و باعث تولید بخار و افزایش فشار در پایان تزریق شد. همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود نتایج آزمایش و شبیه‌سازی، افت فشار تقریباً یکسانی دارند. اما پس از پایان تزریق افزایش فشار محسوسی مشاهده نشد. علت این امر در تفاوت بین واقعیت و نحوه‌ی مدل‌سازی تخلیه است. در واقعیت با کاهش ارتفاع آب، سطح دیواره در حالت خیس باقی می‌ماند ولی در این مدل‌سازی مایعی بر روی دیواره باقی نمانده و تماماً به فاز مایع منتقل شد.

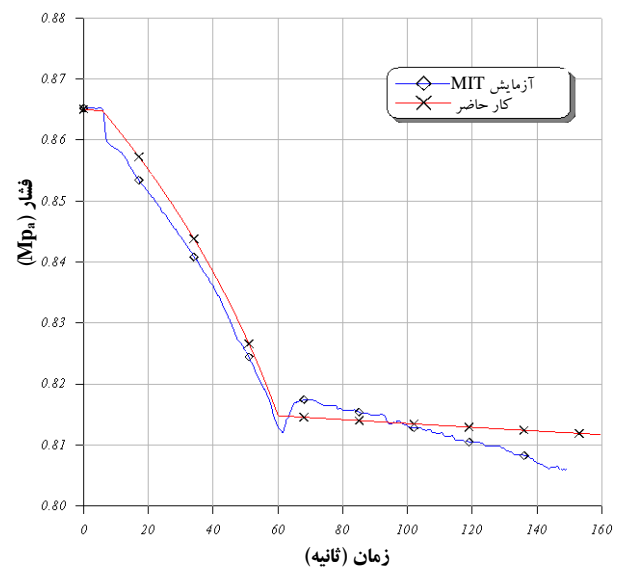
۳.۷ تخلیه پس از تزریق

در این آزمایش تنظیم‌گر فشار ابتدا تا ارتفاع $0.52m$ با آب پر شده و در فشار $6.9bar$ در حال تعادل بود. سپس آب از طریق نازل پایین با نرخ جریان $0.27kg/s$ به تنظیم‌گر فشار تزریق شد. تزریق از ثانیه‌ی ۱۶ شروع و به مدت ۴۷ ثانیه ادامه یافت. بلافاصله پس از پایان تزریق در مدت ۷۸ ثانیه آب با نرخ جریان متوسط حدود $0.28kg/s$ تخلیه شد. لازم به ذکر است که فرایند تخلیه در عمل نمی‌تواند با نرخ جریان ثابت صورت گیرد و لذا از متوسط داده‌های اندازه‌گیری شده برای این آزمایش استفاده شد. این داده‌ها از روی نمودار تغییرات نرخ جریان برحسب زمان [۷] به دست آمد.

فرایند تزریق، مطابق با آنچه که پیش از این گفته شد، تا رسیدن به نقطه‌ی بیشینه‌ی فشار انجام شد. پس از آن با شروع تخلیه، برعکس آزمایش ۲.۷ جوششی در سیال به وجود نیامد. دلیل این امر آن است که فاز مایع در این حالت دمایی پایین‌تر از دمای اشباع متناظر با فشار تنظیم‌گر فشار دارد. با کاهش فشار و رسیدن به فشار نقطه‌ی شروع آزمایش، شرایط جوشش حجمی در فاز مایع به وجود آمد. با شروع فرایند جوشش حجمی از شب کاهش فشار کاسته شد. تغییرات فشار اندازه‌گیری شده در طول این فرایند با نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی در شکل ۷ مقایسه شده‌اند. همانند فرایند تزریق، این مدل، فشار حداکثر کم‌تری را نسبت به نتایج آزمایش MIT پیش‌بینی می‌کند؛ با این حال رفتار نمودار با نتایج آزمایش MIT از تطابق مناسبی برخوردار است.



شکل ۷. تغییرات فشار در فرایند تخلیه پس از تزریق.



شکل ۶. تغییرات فشار در فرایند تخلیه.



۸. نتیجه گیری

مدل سازی پویای رفتار تنظیم گر فشار براساس روش غیرتعادلی و با استفاده از سه ناحیه - یکی برای بخار و دو ناحیه برای آب - انجام شد. در این مدل فرایندهایی نظیر اسپری کردن، انتقال حرارت از طریق گرم کن ها، جوشش حجمی سیال و اثرات چگالش بخار بر روی دیواره با هدایت گذرا در نظر گرفته شد. برای به دست آوردن نرخ چگالش بر روی دیواره و دمای داخلی دیواره‌ی تنظیم گر فشار از معادله‌ی انتقال حرارت دو بعدی هدایت گذرا استفاده شد. با اعمال قوانین پایستگی جرم و انرژی در هر یک از ناحیه‌ها انتالی هر ناحیه به دست آمد. سپس با کمک خواص ترمودینامیکی آب و بخار در شرایط مختلف، و با استفاده از کتابخانه‌ی مرجع [۱۰] و شرط ثابت بودن حجم تنظیم گر فشار، فشار واقعی فشارنده با روش سعی و خطا محاسبه شد.

از آزمایش‌های انجام شده در بخش مهندسی هسته‌ای دانشگاه MIT بر روی یک تنظیم گر فشار آزمایشگاهی برای اعتبارسنجی مدل تهیه شده، استفاده شد. مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی و آزمایش‌های MIT نشان داد که رفتار حالت‌های گذرا در فرایند تزریق، تخلیه و تخلیه پس از تزریق تطابق خوبی با یک‌دیگر دارند، هر چند که مقدار مطلق فشار بیشینه‌ی پیش‌بینی شده توسط این مدل کم‌تر از نتایج آزمایش‌های MIT است.

عمده علت تفاوت در مقدار بیشینه‌ی فشار همان‌گونه که در بخش ۱.۳ به آن اشاره شد، استفاده از معادله‌ی حاکم بر چگالش پایدار بر روی دیواره‌ی عمودی در وضعیتی است که چگالش بخار بر روی دیواره‌ی تنظیم گر فشار نرخ متغیری را با توجه به فشار و دمای دیواره تجربه می‌کند. در این شرایط به دلیل تغییر شدید ارتفاع چگالش در طی فرایند تزریق، ضریب انتقال حرارت چگالش انحراف زیادی از حالت پایدار خواهد داشت و محاسبه نشان داده است که با کم کردن ضریب ثابت رابطه‌ی

(۴) می‌توان تطابق بهتری را بین نتایج محاسبه و آزمایش ایجاد کرد. با این حال در این مدل سازی سعی شد از معادله‌های بدون دخل و تصرف استفاده شود. نکته‌ی دیگری که در نتایج محاسبه جای بحث دارد شیب کاهش فشار در پایان فرایندهای تزریق و تخلیه است که نسبت مستقیمی با مقدار ضریب انتقال از طریق سطح خارجی تنظیم گر فشار به محیط اطراف دارد. در گزارش‌های موجود از آزمایش‌های دانشگاه MIT متأسفانه اطلاعاتی در این ارتباط موجود نیست و محاسبه با فرض دمای محیط ۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و ضریب انتقال حرارت $3 \text{ W/m}^2\text{C}$ انجام شده است که مشابه با تنظیم گر فشار بدون عایق حرارتی و دور از جریان مستقیم هوا است.

در مجموع بررسی‌های انجام شده با این مدل که به صورت یک بسته نرم‌افزار با رابط کاربر گرافیکی برای سهولت در کاربری تهیه شده است نشان داد که این مدل محاسباتی می‌تواند رفتار گذرای تنظیم گر فشار را در شرایط مختلف با سرعت و دقت خوبی شبیه‌سازی نماید. در کاربردهای خاص می‌توان با اعمال ضریب‌ها بر معادله‌ی (۴) و تنظیم ضریب انتقال حرارت چگالش بخار بر روی دیواره، نتایج محاسبه را برای یک تنظیم گر فشار خاص، که نتایج آزمایش‌ها با آن در دسترس باشد، منطبق نمود.

در پایان لازم به توضیح است که در رآکتورهای تحت فشار، نرخ تغییرات سطح آب داخل تنظیم گر فشار نسبت به آزمایش‌های انجام شده در دانشگاه MIT بسیار کم‌تر است و در نتیجه با اطمینان خاطر بیشتری می‌توان از مدل تهیه شده برای شبیه‌سازی رفتار تنظیم گر فشار در این رآکتورها استفاده نمود. در شرایط عادی کار یک رآکتور آب سبک تحت فشار، کندی تغییرات سطح آب و فشار در حدی است که در مواردی حتی از مدل‌های تعادلی نیز برای محاسبه‌ی آن‌ها استفاده شده است.



جدول ۱. فهرست علائم

A	Area, m ²	Subscript	
C _p	Isobaric heat capacity coefficient, kj/kg°C	b	Boiling
E	Energy, j	be	Bulk evaporation
g	Gravity constant, m/s ²	f	Saturated liquid
\hat{h}	Specific Enthalpy, kj/kg	g	Saturated vapor
h	Heat transfer coefficient, W/m ² °C	ht	heater
H	Enthalpy, kj	init	Initial condition
k	Heat conductivity coefficient, W/m°C	iw	Internal surface of the wall
L	Length, m	l	Liquid
m	Mass, kg	pz	Pressurizer
P	Pressurizer, pa	s	Steam
Q	Thermal power, W	sat	Saturated
r	Radial dimension, m	sp	Spray
t	Time, s	cs	Spray condensation
T	Temperature, °C	sui	Insurge
v	Specific volume, m ³ /kg	suo	Outsurge
V	Volume, m ³	ow	External surface of the wall
\dot{m}	Mass flow rate, kg/s	o	Ambient
Z	Axial dimension, m	wc	Wall condensation
α	Thermal diffusivity m ² /s	wet	Wetted area
μ	Dynamic viscosity, kg/ms	wi	Wall inside
ρ	Density, kg/m ³	wo	Wall Outside
n _L	Number of node in wall	Superscript	
		n	Time index

بی‌نوشت‌ها

5. APROS (Advanced Process Simulation Environment) (Vihavainen et al., 1999) has been developed in Finland.
6. TRACE (TRAC/RELAP Advanced Computational Engine) (USNRC, 2005) is the thermal hydraulic tools developed at the USNRC.
7. S. Kim, An Experimental and Analytical Model of a PWR Pressurizer during Transients, Massachusetts Institute of Technology, Ph. D Thesis (1984).
8. U.S. Department of Energy Washington, D.C. 20585, DOE FUNDAMENTALS HANDBOOK MECHANICAL SCIENCE, 2 of 2 (1993).
9. Y.A. Çengel Heat and Mass Transfer: A Practical Approach, (2007).
10. <http://www.x-eng.com>.

۱. In-Surge
۲. Out-Surge
۳. Surge Diffuser

مرجع‌ها

1. G. Leoni, G. Santarossa, Critical Comparison between Theoretical and Experimental Transients of the Enrico Fermi PWR, Energia Nucleare, 14 (1967).
2. A.N. Nahavandi, S. Mackenchery, An Improved Pressurizer Model with Bubble Rise and Condensate Drop Dynamics, Nuclear Engr. and Des. 12 (1970) 135.
3. R.C. Baron, Digital Model Simulation of a Nuclear Pressurizer, Nuclear Sci. and Engr. S2 (1973) 283.
4. E. Takasuo, Modeling of Pressurizer Using APROS and TRACE Thermal Hydraulic Codes, (2006).