



بررسی تأثیر استراتژی نگهداری بر مشخصه های اجرایی سیستم ECCS راکتور VVER1000/V446 تحت تست نظارتی با استفاده از روش چندحالتی مارکوف

محمد حسنی، فاطمه - پیروزمند، احمد*

دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی مکانیک، بخش مهندسی هسته ای

چکیده:

ارزیابی ریسک در نیروگاه های هسته ای به عنوان یکی از دغدغه های مهم این صنعت مطرح است و یکی از عوامل تعیین کننده ریسک در این صنعت، ارزیابی سیستم های ایمنی آماده به کار می باشد. قابلیت اطمینان و در دسترس پذیری تجهیزات این سیستم ها از طریق پرداختن به برنامه تعمیر و نگهداری آن ها، مهم ترین نقش را در بهبود سطح ریسک این نیروگاه ها ایفا می کند. در این مقاله روش چندحالتی مارکوف جهت مدل سازی استراتژی های مختلف نگهداری اجزاء بحرانی سیستم ECCS راکتور VVER1000 به کار گرفته می شود و تغییرات مشخصه های اجرایی سیستم افزونه 1004 متشکل از هر یک از این اجزاء با تغییر در بازه تست نظارتی مورد بررسی قرار می گیرد.

کلمات کلیدی: روش چندحالتی مارکوف، استراتژی های نگهداری، تست نظارتی اجزاء، سیستم ایمنی ECCS

مقدمه:

ارزیابی ریسک سیستم های ایمنی آماده به کار به عنوان یکی از عوامل تعیین کننده ریسک در صنعت هسته ای جهت شناسایی رویدادهای خطرناک و پیشگیری یا کاهش عواقب آن ها مورد توجه است [1,2]. در این راستا پرداختن به شاخص هایی همچون قابلیت اطمینان و در دسترس پذیری این سیستم ها نقش به سزایی را در بهبود بخشی مؤثر سطح ریسک نیروگاه ها بازی می کند [1]. یکی از ابعاد مقوله قابلیت اطمینان جهت دستیابی به سطح بالایی از ایمنی نیروگاه، توجه به استراتژی های تعمیر و نگهداری (R&M) تجهیزات است [1]. استفاده از روش های سنتی مانند روش درخت خطا جهت مدل سازی استراتژی های نگهداری پیچیده همراه با محدودیت بوده و خطای محاسباتی به هنگام افزایش تعداد زیر سیستم ها و اجزاء، افزایش می یابد [1,3]. بنابراین استفاده از روش چندحالتی مارکوف که پتانسیل جایگزینی مدل های بر مبنای روش درخت خطا را دارد و همچنین یک روش کمی مناسب جهت آنالیز سیستم ها با استراتژی های پیچیده نگهداری و وابستگی های بین اجزاء محسوب می شود، توصیه می گردد [4]. در این مقاله جهت کمی سازی

*Availability

†Test & maintenance



شاخص های قابلیت اطمینانی چون عدم درد ستर्स پذیری و متوسط زمان تا خرابی^۳ سیستم های افزونه^۴ یک از چهار (1004) متشکل از اجزاء بحرانی سیستم ایمنی ECCS^۵ راکتور VVER1000 که یکی از مهم ترین سیستم های ایمنی نیروگاه جهت برداشت گرما از قلب راکتور در شرایط نرمال و حادثه می باشد، از روش مارکوف استفاده می شود. در واقع روش مارکوف جهت پیاده سازی سه استراتژی مختلف R&M به کار گرفته می شود و میزان تغییرات عدم در دسترس پذیری سیستم های افزونه در هر یک از این استراتژی ها با تغییر در بازه تست نظارتی^۶ اجزاء مورد بررسی قرار می گیرد و به این ترتیب تأثیر اقدامات نگهداری بر شاخص های قابلیت اطمینان سیستم های افزونه چهار جزئی برای اجزائی همچون پمپ، رگولاتور و یک شیر ایمنی مربوط به سیستم خنک کننده اضطراری راکتور ارزیابی می شود. قابل ذکر است که هر ۴ جزء افزونه از هر یک از اجزاء مذکور را به صورت یک سیستم و از این پس به عنوان FCRS^۷ می شناسیم.

روش کار :

با توجه به اینکه در این پژوهش بررسی تأثیر اقدامات نگهداری بر مشخصه های اجرایی FCRS متشکل از اجزاء بحرانی سیستم ECCS مد نظر است، ابتدا اجزاء بحرانی این سیستم با توجه به معیارهای اهمیت RRW^۸ و RAW^۹ که از جمله معیارهای اهمیت مربوط به فاز نگهداری تجهیز می باشند با استفاده از اسناد PSA^{۱۰} مربوط به راکتور VVER1000 استخراج می شوند [6,5]. از بین اجزاء بحرانی استخراج شده؛ اجزاء پمپ، رگولاتور و یک شیر ایمنی در این تحقیق مورد بررسی قرار می گیرند. سه استراتژی مختلف نگهداری که در ادامه معرفی می شوند، در قالب مدل مارکوف، که روشی است جهت توصیف و آنالیز گذارهای مختلف قابل رخداد بین حالات مختلف سیستم، بر روی اجزاء مذکور مورد پیاده سازی قرار می گیرند و تغییرات شاخص هایی اجرایی FCRS با هر یک از این استراتژی ها و همچنین با تغییر در بازه تست اجزاء ارزیابی می شود. در این تحقیق پنج حالت مختلف برای اجزاء در نظر گرفته می شود: (۱) حالت خرابی (F)،

^۳Mean time between failure

^۴ Redundant systems

^۵Emergency core cooling system

^۶Surveillance test interval

^۷Four components redundant system

^۸Risk reduction worth

^۹Risk achievement worth

^{۱۰}Failure



(۲) حالت عملکردی (A)، (۳) حالت تست (M)، (۴) حالت تعمیر (R) و (۵) حالت فرسودگی (D). گذارهای ممکن و قابل رخداد بین حالت ها مطابق با جدول (۱) با نرخ های گذر نشان داده شده امکان پذیر است.

جدول شماره (۱): گذارهای قابل رخداد و نرخ های گذار در مدل مارکوف

	A	D	M	R	F
A	-	λ_0	ξ	-	λ_1
D	-	-	α	-	β
M	η	-	-	-	-
R	μ	-	-	-	-
R	-	-	-	ξ	-

معرفی استراتژی های نگهداری پیاده شده در پژوهش :

در این پژوهش سه استراتژی R&M زیر براساس [3] در سطح جزء مورد بررسی قرار می گیرد.

(۱) پس از مشخص شدن خرابی یک جزء پس از انجام تست نظارتی، جزء تحت تعمیر قرار می گیرد و هیچگونه تست اضافی بر روی سایر اجزاء افزونه FCRS انجام نمی شود. به عبارتی دیگر روال تست زمان بندی شده برای سایر اجزاء افزونه از سر گرفته می شود.

(۲) پس از مشخص شدن خرابی یک جزء پس از انجام تست نظارتی، جزء خراب تحت تعمیر قرار گرفته و پس از اتمام تعمیر، سایر اجزاء یکی پس از دیگری وارد تست می شوند. بنابراین پیاده سازی این نوع استراتژی مستلزم انجام تست اضافی اجزاء افزونه می باشد.

(۳) پس از مشخص شدن خرابی یک جزء پس از انجام تست نظارتی آن، جزء خراب بلافاصله وارد تعمیر شده و همزمان با آن سایر اجزاء افزونه نیز تست می گردند و در صورت خرابی هر یک از آن ها، به طور همزمان تحت تعمیر قرار می گیرند. بنابراین این نوع استراتژی علاوه بر ایجاب تست اضافی اجزاء افزونه، امکان تعمیر همزمان اجزاء خراب را نیز فراهم می سازد.

فرضیات در نظر گرفته شده در پیاده سازی استراتژی های نگهداری :

^۱Available

^۲Maintenance

^۳Repair

^۴Degradation



جهت پیاده سازی استراتژی های نگهداری برای FCRS افزونه در سطح جزء فرضیاتی به صورت زیر در نظر گرفته می شود: امکان رخداد خرابی برای دو، سه و چهار جزء به طور همزمان به واسطه رخداد خرابی عامل مشترک^۱، علاوه بر رخداد خرابی مستقل برای اجزاء وجود دارد و فرض بر این است که خرابی های رخ داده تا زمانی که اجزاء تحت تست نظارتی قرار نگیرند، غیر قابل مشاهده هستند. پس از مشاهده خرابی یک جزء به دنبال انجام تست نظارتی با بازه های زمانی مشخص، جزء بلافاصله در تعمیر قرار می گیرد و فرض می گردد که در هنگام تعمیر یک جزء، امکان خرابی سایر اجزاء نیز وجود دارد. تست اجزاء به صورت تست تناوبی^۲ بوده و مدت زمان تست، در عدم دسترسی اجزاء نقش ندارد. زمان تست در مقایسه با مدت زمان تعمیر نیز قابل صرف نظر کردن است. بعلاوه فرض می شود که زمانی که جزء در حالت فرسوده قرار دارد همچنان در دسترس و قادر به انجام عملکرد خود می باشد و امکان گذار از این حالت تنها به حالت تست و همچنین به حالت خرابی در صورت رخداد فرسودگی شدید وجود دارد.

داده های مورد نیاز مدل مارکوف :

جهت کمی سازی مدل مارکوف و انجام محاسبات سه استراتژی R&M بیان شده برای اجزاء بحرانی سیستم ECCS، از داده های قابلیت اطمینان متناظر با سیستم استفاده می شود. جدول (۲) مقادیر مورد استفاده در مدل مارکوف را به طور نمونه برای یکی از پمپ های ECCS نشان می دهد. پارامترهای نرخ خرابی مستقل^۳، بازه تست^۴، طول دوره تست^۵ و نرخ تعمیر^۶ که به ترتیب با λ_1 ، β ، η و μ نشان داده می شوند، از مدارک PSA نیروگاه برای هر یک از اجزاء منتخب تعیین می شوند [6]. نرخ خرابی های عامل مشترک (λ_2 ، λ_3 ، λ_4) نیز با استفاده از مدل آلفا تعیین می گردند [6]. پارامتر نرخ فرسودگی (λ_0) نیز از مدارک NUREG استخراج می گردد [7]. برای پارامتر α نیز که بیانگر نرخ گذار از فرسودگی جزء به تست است؛ به دلیل نرخ ثابت فرسودگی، فرض می شود که فرسودگی به طور متوسط در نیمه بازه بین تست های زمانبندی^۷ شده رخ می دهد، بنابراین مقدار معادل با $\frac{1}{2}\beta$ تخمین زده می شود [8]. همچنین مقدار β نیز که نرخ گذار از فرسودگی به خرابی را نشان می دهد، با توجه به نرخ آهسته یا سریع فرسودگی، به صورت ضربی از نرخ خرابی ثابت (λ_1) در نظر گرفته می شود [8].

^۱Common cause failure

^۲Staggered test

^۳Independent failure rate

^۴Test interval

^۵Test duration

^۶Repair rate

^۷Schedule maintenance



نتایج :

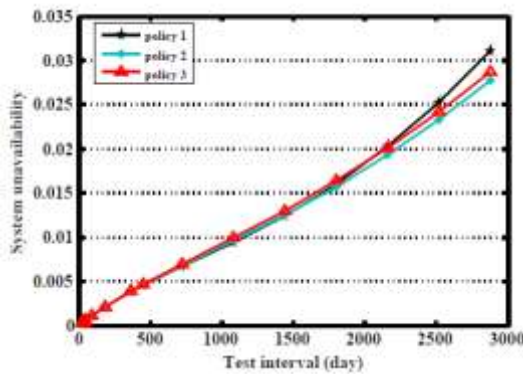
در این بخش نتایج مربوط به پیاده سازی استراتژی های مختلف R&M برای FCRS متشکل از اجزاء بحرانی سیستم ایمنی ECCS مورد ارزیابی قرار می گیرد. سه جزء بحرانی پمپ، رگولاتور و شیر ایمنی از بین اجزاء بحرانی انتخاب شده و تغییرات مشخصه های اجرایی سیستم شامل عدم دسترس پذیری و متوسط زمان تا خرابی با تغییر در بازه تست برای سه سیستم FCRS برای هر یک از اجزاء مذکور به طور مجزا بررسی می شود. پارامتر عدم در دسترس پذیری مربوط به هر یک از اجزاء بحرانی مذکور در شکل (۱: الف-ج) نشان داده می شود. بدیهی است که با افزایش بازه تست اجزاء، خرابی پنهان اجزاء دیرتر مشخص شده و در نتیجه در افزایش عدم دسترسی سیستم تأثیر مستقیم دارد. پارامتر عدم دسترسی وابستگی مستقیمی به احتمال رخداد حالات عدم در دسترس بودن سیستم در مدل مارکوف دارد؛ یعنی حالاتی از سیستم که اجزاء آن در حالت های خرابی و تعمیر هستند. در استراتژی تست ۱ با توجه به اینکه فرآیند تست و تشخیص خرابی طبق زمانبندی صورت گرفته برای نگهداری اجزاء انجام می شود؛ بنابراین احتمال رخداد خرابی پنهان اجزاء مقدار بزرگتری دارد و این در عدم در دسترس بودن بیشتر سیستم نسبت به سایر سیاست ها مؤثر است. از طرفی دیگر در استراتژی ۳ با توجه به فرآیند نگهداری تعریف شده در این سیاست، امکان تشخیص زودهنگام خرابی و به دنبال آن قرارگیری جزء در حالت تعمیر افزایش می یابد و این عامل موجب افزایش تعداد دفعاتی که FCRS حالت در دسترس نبودن سیستم را تجربه می کند می شود؛ بنابراین عدم دسترسی سیستم نسبت به استراتژی تست ۲ بیشتر است. اما چون احتمال رخداد هر یک از حالات عدم در دسترس نسبت به استراتژی ۱ کمتر است، بنابراین از مقایسه موجود در نمودارها، استراتژی ۳ نسبت به ۱، از عدم دسترسی کمتری برخوردار است.

جدول شماره (۲): مقادیر پارامترهای مورد استفاده در مدل مارکوف برای یکی از پمپ های ECCS [8,7,6]

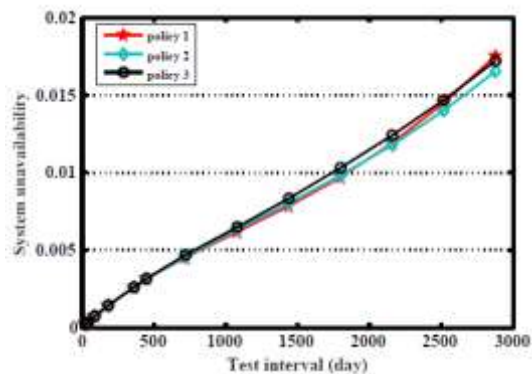
Component	Parameters of Markov model									
	λ_1 (1/hr)	ξ (1/hr)	λ_0 (1/hr)	μ (1/hr)	η (1/hr)	β (1/hr)	α (1/hr)	λ_2 (1/hr)	λ_3 (1/hr)	λ_4 (1/hr)
A pump of ECSC	2.35E-06	1.49E-03	2.0E-07	0.0139E+00	1.0E+00	3.055E-06	7.44E-04	1.30E-07	4.17E-08	5.38E-07

^{***}Unavailability

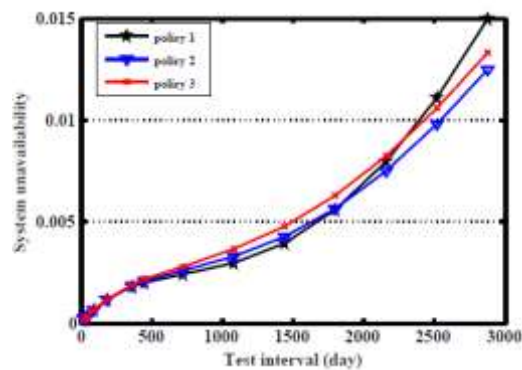
در شکل (۲: الف-ج) نیز پارامتر MTBF برای FCRS های مربوط به پمپ، رگولاتور و شیر در بازه های تست مختلف و برای ۳ استراتژی تست نشان داده می شود. همانگونه که انتظار می رود با افزایش بازه تست اجزاء که معادل با گذشت مدت زمان بیشتری از عمر سیستم است، متوسط زمان بین خرابی های رخ داده افزایش می یابد.



(ب)

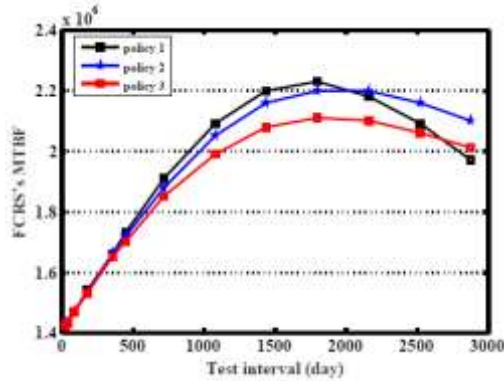


(الف)

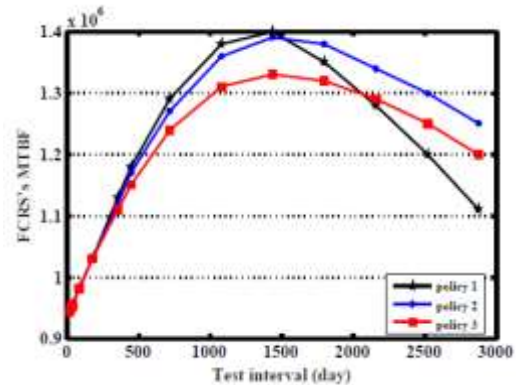


(ج)

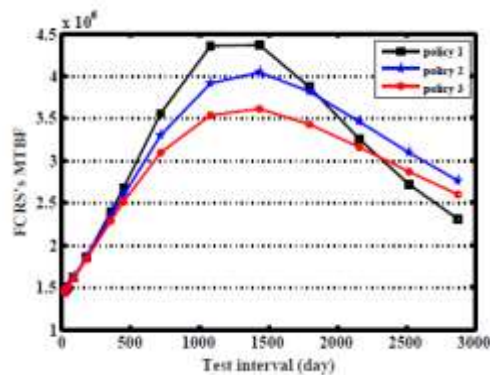
شکل شماره ۱: عدم دسترس پذیری FCRS بر حسب بازه های تست مختلف در سه استراتژی تست برای اجزاء الف) پمپ، ب) رگولاتور و ج) شیر ایمنی



(ب)



(الف)



(ج)

شکل شماره ۲: MTBF برای FCRS بر حسب بازه های تست مختلف در سه استراتژی تست برای اجزاء الف) پمپ،

ب) رگولاتور و ج) شیر ایمنی

بحث و نتیجه گیری:

با توجه به اینکه پرداختن به برنامه تعمیر و نگهداری تجهیزات ایمنی نیروگاه های هسته ای و بررسی شاخص های قابلیت اطمینان و در دسترس پذیری این تجهیزات، نقش کلیدی را در بهبود سطح ریسک این نیروگاه ها ایفا می کند، بنابراین در این تحقیق استراتژی های مختلف نگهداری برای اجزاء بحرانی سیستم ECCS راکتور VVER1000 به کار گرفته شد و تغییرات مشخصه های اجرایی همچون عدم دسترسی و متوسط زمان تا خرابی سیستم های افزونه 1004 متشکل از سه جزء منتخب از اجزاء مذکور با تغییر در بازه تست نظارتی اجزاء ارزیابی گردید. گفتنی است با توجه به محدودیت های روش های سنتی مانند روش درخت خطا در مدلسازی استراتژی های پیچیده نگهداری، در این پژوهش



از روش چندحالتی مارکوف استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که سیاست تست ۳ نسبت به دو سیاست دیگر برای یک دوره تست نظارتی یکسان در دسترس بودن سیستم را افزایش می‌دهد. همچنین برای هر سه سیاست تست با تغییر دوره تست نظارتی یک مقدار بهینه از نقطه نظر حداکثر شدن مقدار متوسط زمان بین دو خرابی سیستم وجود دارد.

سپاسگزاری:

تحقیق پیش رو با حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (INSF) در قالب حمایت از رساله دکتری صورت گرفته است.

مراجع:

- [1] Kančev, D., & Čepin, M. Evaluation of Risk and Cost Using an Age-Dependent Unavailability Modelling of Test and Maintenance for Standby Components. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24(2), 146-155, (2011).
- [2] IAEA .INSAG-3: Basic Safety Principles for Nuclear Power Plants, 75-INSAG-3 Rev. 1, International Atomic Energy Agency, (1999).
- [3] Hellmich, M., & Berg, H. P. Markov Analysis of Redundant Standby Safety Systems under Periodic Surveillance Testing. *Reliability Engineering & System Safety*, 133, 48-58., (2015).
- [4] Matsuoka, T. Overview of system reliability analyses for PSA. In *Progress of Nuclear Safety for Symbiosis and Sustainability* (pp. 83-95). Springer, Tokyo, (2014).
- [5] Nøklund, T. E., & Aven, T. On Selection of Importance Measures in Risk and Reliability Analysis. *International Journal of Performability Engineering*, 9(2), (2013).
- [6] PSA. PSA of of Bushehr Nuclear Power Reactor. Probabilistic Safety Assessment level 1, App. G, (2003).
- [7] Vesely, W. E. Approaches for Age-Dependent Probabilistic Safety Assessments with Emphasis on Prioritization and Sensitivity Studies. NUREG/CR-5587, SAIC-92/1137, prepared for U.S. NRC, (1992).
- [8] Vesely, W. E., & Rezos, J. T. Risk-Based Maintenance Modeling. NUREG/CR-6002, BNL-NUREG-52332, Brookhaven National Laboratory, (1995).