



بررسی اثر فرسودگی بر اجزاء بحرانی سیستم ایمنی ECCS نیروگاه هسته ای VVER1000 با استفاده از مدل مارکوف

محمد حسنی، فاطمه - پیروزمند، احمد *

دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی مکانیک، بخش مهندسی هسته ای

چکیده:

بررسی فرسودگی اجزاء از این حیث که بسیاری از اجزاء و سیستم های مکانیکی و ساختاری با فرآیند فرسودگی مواجه هستند و این خود عامل خرابی های تصادفی اجزاء محسوب می شود؛ حائز اهمیت است. از این رو در مقاله حاضر به کمی سازی اثر فرسودگی در قالب محاسبه احتمال حضور اجزاء در حالت فرسودگی و چگونگی تغییر آن با افزایش بازه تست و نگهداری اجزاء با استفاده از روش چندحالتی مارکوف که یک رویکرد صریح جهت بررسی شرایط جزء فرسوده است؛ پرداخته می شود. همچنین در این تحقیق، احتمال حضور اجزاء در حالت فرسودگی با نرخ های کند و سریع مورد مقایسه قرار می گیرد. بررسی های مذکور برای دو جزء از اجزاء بحرانی سیستم ایمنی ECCS راکتور VVER1000 صورت می پذیرد. کلمات کلیدی: فرسودگی، روش چندحالتی مارکوف، سیستم ECCS راکتور VVER1000

مقدمه:

بدیهی است که با به کارگیری و استفاده تدریجی از اجزاء، آن ها دچار فرسودگی می شوند که مقدار فرسایش اجزاء را برحسب خوردگی، ترک خوردگی و یا شکستگی بسته به محیط و شرایط کاری جزء می توان اندازه گیری نمود [1]. در نظر گرفتن فرآیند فرسودگی اجزاء از این حیث قابل اهمیت است که فرسودگی برای بسیاری از سیستم های مکانیکی و ساختاری که با این فرآیند مواجه هستند به عنوان یک عامل خرابی تصادفی محسوب می شود. چنین فرآیند فرسودگی را با استفاده از فرآیندهای آماری می توان مدل سازی نمود [2]. یک رویکرد دیگر جهت بررسی شرایط فرسودگی جزء، استفاده از انواع خاصی از مدل های مارکوف است. یکی از اهداف به کارگیری رویکرد مارکوف کمی سازی اثرات حالت های مختلف قابل رخداد برای اجزاء از جمله اثر فرسودگی بر آن ها می باشد [3]. تاکنون تحقیقات متعددی در زمینه های مختلف همچون به کارگیری مدل شبه مارکوف جهت بررسی رخداد خرابی اجزاء به واسطه زوال و فرسودگی به موازات خرابی های حاصل از رخدادهای تصادفی [4] و یا ارائه مدلی جهت آنالیز زوال اجزاء جهت درک هرچه بیشتر فرآیند فرسودگی آن ها با تمرکز بر چگونگی تغییرات نرخ فرسودگی با عمر جزء [5] صورت گرفته است.



در این پژوهش از مدل چند حالت مارکوف جهت کمی سازی اثر فرسودگی در قالب محاسبه احتمال حضور اجزاء در حالت فرسودگی^۱ (DSP) استفاده می شود. به عبارتی دیگر حالت فرسودگی به موازات سایر حالت های قابل رخداد برای اجزاء در مدل مارکوف در نظر گرفته می شود و با تغییر در بازه تست و نگهداری اجزاء که جهت آشکار نمودن شرایط خرابی و فرسودگی به صورت دوره ای صورت می گیرد، تغییرات پارامتر DSP مورد بررسی قرار می گیرد. همچنین با تغییر در نرخ فرسودگی اجزاء که به صورت کند و سریع قابل رخداد است، پارامتر DSP در این دو حالت مورد مقایسه قرار می گیرد. لازم به ذکر است که بررسی های مذکور در این پژوهش برای دو جزء از اجزاء بحرانی سیستم خنک کننده اضطراری قلب^۲ (ECCS) راکتور VVER1000، با توجه به اهمیت و نقش کلیدی این سیستم ایمنی در فرونشانی بسیاری از حوادث نیروگاه، مورد پیاده سازی قرار می گیرد.

روش کار :

با توجه به اینکه سیستم ECCS یکی از مهم ترین سیستم های ایمنی نیروگاه های هسته ای است و نقش حیاتی را در فرونشانی بسیاری از حوادث قابل رخداد در نیروگاه بازی می کند؛ در این پژوهش، بررسی بحث فرسودگی برای برخی از اجزاء این سیستم مد نظر است. در ابتدا براساس مدارک ارزیابی احتمالاتی ایمنی^۳ (PSA) نیروگاه VVER1000، تعدادی از اجزاء بحرانی سیستم ECCS استخراج می شوند [6] که در این بین یک پمپ و یک رگولاتور از جمله اجزاء مورد بررسی در این مقاله هستند. سپس حالت فرسودگی^۴ (D) جزء به موازات سایر حالت های قابل رخداد برای جزء مانند حالات عملکردی^۵ (A)، خرابی^۶ (F) و تست^۷ (T) در روش مارکوف که در ادامه مورد بحث قرار خواهد گرفت مورد مدلسازی قرار می گیرد و پس از تعیین نرخ های گذر قابل رخداد بین حالت های مختلف نشان داده شده در دیاگرام گذار^۸ شکل (۱) برای یک جزء ملاحظه می کنید، احتمال حضور هر جزء در حالت فرسودگی محاسبه می شود. سپس با تغییر در بازه تست نظارتی اجزاء که جهت کسب اطمینان از عملکردی بودن جزء و مشخص شدن حالت فرسودگی و یا خرابی احتمالی صورت می گیرد؛ تغییرات DSP با تغییرات بازه تست که به نوعی دلالت بر سپری شدن عمر جزء نیز می باشد، مورد بررسی قرار می گیرد.

^۱Degradation state probability

^۲Emergency core cooling system

^۳Probabilistic safety assessment

^۴Degradation

^۵Available

^۶Failure

^۷Maintenance

^۸Transition diagram



نرخ های گذر λ_1 ، ξ ، η و μ نشان داده شده در شکل (۱) که به ترتیب نرخ خرابی، بازه تست، طول دوره تست و نرخ تعمیر^۲ را نشان می دهند؛ با توجه به مدارک PSA نیروگاه تعیین می شوند [6]. پارامتر λ_0 نیز که نرخ گذار از حالت عملکردی به فرسودگی را نشان می دهد، از مدارک NUREG استخراج می گردد [7]. همانگونه که ملاحظه می کنید پارامتر β که نرخ گذار از حالت فرسودگی جزء به حالت خرابی را نشان می دهد، براساس NUREG/CR-6002 از رابطه زیر به دست می آید [3]:

$$\beta = \lambda \frac{r_{AD}(1-f_{AF})}{r_{AD} - (1-f_{AF})} \quad (1)$$

در این رابطه λ بیانگر نرخ خرابی مستقل جزء و r_{AD} بیانگر نسبت فرسودگی است که یک فاکتور نسبی بوده و مقادیر کوچک آن در محدوده $1 < r_{AD} \leq 3$ بیانگر فرسودگی کند و مقادیر بزرگتر آن ($10r_{AD} \geq$) نشان دهنده فرسودگی سریع است. در پژوهش حاضر اثرات هردو فرسودگی با نرخ های کند و سریع مورد بررسی قرار می گیرد و تغییرات پارامتر DSP نسبت به تغییر در بازه تست نظارتی اجزاء برای هر دو نوع فرسودگی کند و سریع ارزیابی می شود. پارامتر f_{AF} در رابطه (۱) کسر خرابی های فاجعه آمیز^۳ را نشان می دهد و براساس NUREG/CR-6002 مقدار کوچک آن ($f_{AF} = 0.1$) بیانگر سهم کوچکی از خرابی های فاجعه آمیز جزء است که از طریق فرسودگی باعث خرابی نمی شوند [3].

مدل چندحالتی مارکوف:

روش مارکوف یک فرآیند تصادفی متغیر با زمان است؛ در صورتی که خاصیت مارکوف برقرار باشد. خاصیت مارکوف دلالت بر فاقد حافظه بودن این مدل دارد و بیانگر این است که حالت بعدی جزء به حالت فعلی آن وابسته بوده و کاملاً مستقل از حالات قبلی جزء است [8]. این روش جهت توصیف و آنالیز گذارهای مختلف قابل رخداد بین حالات مختلف جزء یا سیستم به کار می رود و یک روش مناسب جهت مدلسازی سیستم ها با تعداد حالات متعدد و تعداد اجزاء زیاد می باشد [8]. معادله حاکم در روش مارکوف، معادله حالت (۲) است که در آن $P(t)$ بیانگر احتمال گذار از یک حالت به حالت دیگر است و A نرخ گذار بین حالت ها را نشان می دهد. لازم به ذکر است که در پژوهش حاضر از فرم حالت پایای معادله مارکوف استفاده شده است. پس از حل معادله مارکوف، می توان احتمال گذار بین حالت های مختلف و همچنین احتمال حضور در یک حالت خاص را به دست آورد.

^۱Failure rate

^۲Test interval

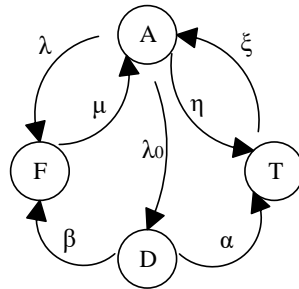
^۳Test duration

^۴Repair rate

^۵Catastrophic failure fraction

$$\dot{P}(t) = A \cdot P(t)$$

(2)

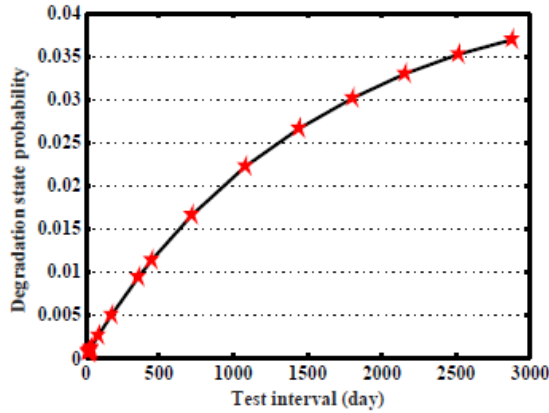


شکل شماره (۱): دیاگرام گذر حالات مدل شده مربوط به یک جزء

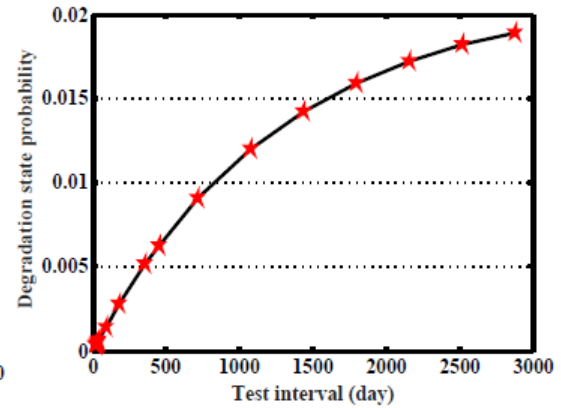
نتایج :

در این بخش نتایج مربوط به بررسی افزودن حالت فرسودگی به موازات سایر حالت های خرابی، عملکردی و تست در قالب مدل مارکوف برای دو جزء از اجزاء بحرانی سیستم ایمنی ECCS ارائه می گردد. شکل (۲) تغییرات پارامتر DSP با تغییرات بازه تست نظارتی اجزاء را برای دو جزء پمپ و رگولاتور نشان می دهد و در جدول (۱) نیز این تغییرات به صورت کمی نشان داده می شود. همانگونه که ملاحظه می کنید احتمال حضور جزء در حالت فرسودگی حاصل از مدل مارکوف با افزایش بازه تست نظارتی از ۲۰ روز به ۲۸۸۰ روز (معادل با ۹۶ ماه) افزایش می یابد. با توجه به اینکه با افزایش بازه تست و بازبینی اجزاء، دیرتر متوجه رخداد فرسودگی جزء می شویم و در نتیجه جزء با تأخیری معادل با زمان تست نظارتی از حالت فرسودگی وارد حالت تست می شود، بنابراین افزایش احتمال حضور در حالت فرسودگی با افزایش بازه تست توجیه پذیر است.

همانگونه که در روش انجام کار توضیح داده شد، اثر نرخ های کند و سریع فرسودگی در پارامتر β لحاظ می گردد. با تغییر در نرخ رخداد فرسودگی، در شکل (۳) به بررسی تغییرات پارامتر DSP با افزایش بازه تست نظارتی اجزاء تا ۲۸۸۰ روز، برای هر دو نرخ کند و سریع پرداخته می شود.



(ب)



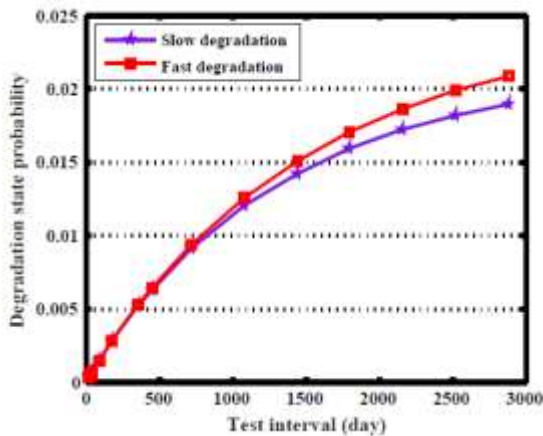
(الف)

شکل شماره ۲: تغییرات احتمال حضور در حالت فرسودگی با تغییر در بازه تست نظارتی اجزاء بحرانی (الف) رگولاتور و (ب) پمپ

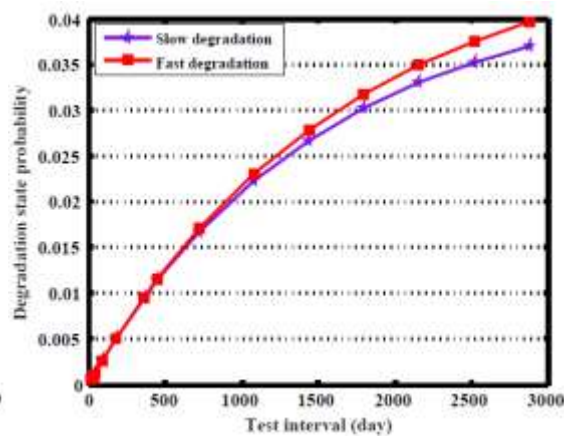
جدول شماره (۱): تغییرات پارامتر DSP برحسب تغییرات بازه تست نظارتی برای اجزاء بحرانی پمپ و رگولاتور

TR (day)	DSP for Pump	DSP for Regulator
20	3.33E-04	5.94E-04
24	3.99E-04	7.11E-04
28	4.65E-04	8.28E-04
32	5.30E-04	9.45E-04
36	5.95E-04	1.06E-03
40	6.60E-04	1.18E-03
90	1.45E-03	2.60E-03
180	2.80E-03	5.02E-03
360	5.20E-03	9.41E-03
450	6.28E-03	1.14E-02
720	9.07E-03	1.66E-02
1080	1.20E-02	2.23E-02
1440	1.42E-02	2.67E-02
1800	1.59E-02	3.02E-02
2160	1.72E-02	3.30E-02

2520	1.82E-02	3.52E-02
2880	1.89E-02	3.70E-02



(ب)



(الف)

شکل شماره ۳: تغییرات احتمال حضور در حالت فرسودگی برحسب تغییر در بازه تست نظارتی اجزاء بحرانی (الف) رگولاتور و (ب) پمپ در دو حالت فرسودگی با نرخ های کند و سریع

بحث و نتیجه گیری :

با توجه به اینکه فرسودگی اجزاء، یکی از عوامل خرابی های تصادفی آن ها محسوب می شود و از این حیث بسته به نوع فرسودگی ایجاد شده، عدم عملکرد صحیح اجزاء را به همراه دارد؛ بنابراین پرداختن به بحث فرسودگی اجزاء و کمی سازی این مقوله به ویژه محاسبه احتمال حضور جزء در حالت فرسودگی و بررسی تغییرات آن با بازه تست نظارتی اجزاء، اهمیت به سزایی دارد؛ چرا که از این طریق می توان بازه تست نظارتی معقول را که احتمال ماندن جزء در حالت فرسوده حداقل ممکن باشد انتخاب نمود که البته این امر با در نظر گرفتن سایر ملاحظات انتخاب بازه تست نظارتی همچون بحث هزینه و ریسک نشأت یافته از انجام تست، امکان پذیر است.

با توجه به اهمیت بحث فرسودگی در مورد اجزاء مربوط به سیستم های ایمنی نیروگاه، در این تحقیق کمی سازی پارامتر DSP و تغییرات آن با بازه های تست مختلف برای دو جزء از اجزاء بحرانی سیستم ایمنی ECCS راکتور VVER1000 با استفاده از روش چندحالت مارکوف مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین تغییرات DSP در دو حالت رخداد فرسودگی با نرخ های کند و سریع، برای اجزاء پمپ و رگولاتور مقایسه گردید. نتایج نشان می دهد تنها برای دوره تست های نظارتی طولانی افزایش مقدار DSP در حالت زخداد فرسودگی با نرخ سریع نسبت به حالت کند قابل ملاحظه است.



سپاسگزاری :

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

مراجع :

- [1] Soares, W. A., Vasconcelos, V. D., & Rabello, E. G. Risk-based inspection in the context of nuclear power plants, International Nuclear Atlantic Conference, INAC 2015, São Paulo, Brazil, October 4-9, (2015).
- [2] Huynh, K. T., Castro, I. T., Barros, A., & Bérenguer, C. Modeling age-based maintenance strategies with minimal repairs for systems subject to competing failure modes due to degradation and shocks. European journal of operational research, 218(1), 140-151, (2012).
- [3] Vesely, W. E., & Rezos, J. T. Risk-Based Maintenance Modeling. NUREG/CR-6002, BNL-NUREG-52332, Brookhaven National Laboratory, (1995).
- [4] Tomasevicz, C. L., & Asgarpoor, S. Optimum maintenance policy using semi-Markov decision processes. Electric Power Systems Research, 1286–1291, (2009).
- [5] Samanta, P. K., Hsu, F., Subduhi, M., & Vesely, W. E. Degradation modeling with application to aging and maintenance effectiveness evaluations (No. BNL-NUREG-45309; CONF-9010185-10). Brookhaven National Lab., Upton, NY (USA), (1991).
- [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] Matsuoka, T. Overview of system reliability analyses for PSA. In Progress of Nuclear Safety for Symbiosis and Sustainability (pp. 83-95). Springer, Tokyo, (2014).