

## توسعه مدل عدم دسترس پذیری وابسته به عمر تجهیز ایمنی برای کاربرد در ارزیابی ایمنی احتمالاتی سطح ۱ نیروگاه هسته ای

سیامک پارسایی<sup>۱</sup>، محمد رضا نعمت‌اللهی<sup>۲</sup>، احمد پیروزمند<sup>۳</sup> و محمدرضا زره پوش<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، s.parsaei@shirazu.ac.ir

۲- استاد، مرکز تحقیقات ایمنی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، nema@shirazu.ac.ir

۳- دانشیار، رئیس مرکز تحقیقات ایمنی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، pirouzm@shirazu.ac.ir

۴- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران، M.reza.zerehpooosh@gmail.com

### چکیده

ایمنی نیروگاه‌های هسته‌ای به عملکرد موفقیت آمیز اجزای حیاتی سیستم‌های ایمنی بستگی دارد. پیش‌بینی وضعیت عملکردی تجهیزات ایمنی در حالت آماده باش در نیروگاه هسته‌ای براساس معیار عدم دسترس پذیری تعیین می‌گردد. این پژوهش یک مدل عدم دسترس پذیری تجهیز ایمنی در حالت آماده باش را پیشنهاد می‌کند که اثرات کامل فرسودگی ناشی از زمان سپری شده از نصب، تخریب تجهیز به دلیل تست‌های نظارت برنامه‌ریزی شده و بهبود مستمر مربوط به اقدامات تعمیر و نگهداری را شامل می‌شود. این مدل در ارزیابی عدم دسترس پذیری شیرهای موتوری و پمپ موتوری موجود در زیر سیستم تزریق خنک کننده فشار بالا، مربوط به سیستم خنک کننده اضطراری قلب نیروگاه هسته‌ای VVER/1000-V446 بکار گرفته می‌شوند و با سایر مدل‌های عدم دسترس پذیری موجود مقایسه می‌گردد. همچنین عدم دسترس پذیری در سطح سیستم ناشی از این مدل‌ها نیز ارزیابی و مقایسه می‌گردد. علاوه بر این تأثیر مدل‌های مختلف در ارزیابی عدم دسترس پذیری در فرکانس آسیب به قلب این نیروگاه در طول پنج دوره نگهداری منعکس می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که در مقایسه با مدل‌های دیگر که به طور همزمان اثرات تخریب ناشی از تست و اثربخشی تعمیر و نگهداری را در نظر نمی‌گیرند، مدل پیشنهادی به‌طور واقع‌بینانه‌ای عدم دسترس پذیری تجهیزات ایمنی و سیستم‌های در بر دارنده آنها را در طول عمر نیروگاه ارزیابی می‌کند. بنابراین، این مدل قادر است که به طور موثرتری معیار ریسک CDF وابسته به عمر ناشی از یک سیاست تست و نگهداری تعیین شده را در یک افق زمانی معین منعکس کند.

واژه‌های کلیدی: عدم دسترس پذیری، تخریب تدریجی ناشی از تست، نگهداری پیشگیرانه، PSA و CDF

### مقدمه

در بازه زمانی آخرین بازرسی تست نظارتی (STI)، یعنی قبل از انجام تست رخ داده باشد. با این حال، علاوه بر این جنبه‌های مثبت، تست‌های نظارتی ممکن است عوارض نامطلوبی نیز به همراه داشته باشند و منجر به شکل‌گیری ریسک‌های متعددی شوند. برخی از این ریسک‌ها عبارتند از شروع حالت ترانزیت در نیروگاه در طول تست، فرسودگی تدریجی تجهیزات به دلیل تجمع تخریب‌های ناشی از تست، پیکربندی‌های نادرست یا خطا در بازگردانی تجهیزات، از کار افتادگی تجهیز در حین تست و قرار گرفتن غیر ضرور اپراتورها در معرض تابش.

مشخصات فنی (TS)، تست‌های نظارتی بر روی تجهیزات مهم مربوط به ایمنی NPP‌ها را معمولاً به صورت ماهانه و گاهی اوقات بیشتر، الزام می‌کند تا اطمینان حاصل شود که سیستم‌های ایمنی در حالت آماده باش، شروع به کار کرده و عملکردهای مورد نظر را در صورت وقوع شرایط غیر نرمال در نیروگاه انجام می‌دهند. جنبه مثبت تست از نظر کاهش ریسک، تشخیص عیوب پنهان تجهیزات است که ممکن است

ناقص، شرایط عملیاتی و راندمان تست را شامل می شوند [۴، ۱۴-۱۶]. مدل‌های دیگر عدم دسترس پذیری وابسته به زمان تجهیزات ایمنی، اثرات فرسودگی، تست، اقدامات نگهداری اصلاحی، پیشگیرانه و اورهال را شامل می‌شوند [۱، ۱۷]. با این حال، در این مدل‌ها اثرات تخریب تدریجی ناشی از تست‌ها در نظر گرفته نشده است.

به طور کلی، مطالعات قبلی نشان داده‌اند که مدل‌های پیش‌بینی‌کننده عدم دسترس پذیری تجهیزات ایمنی نیروگاهی باید به صورت همزمان تابعی از تعداد تست‌ها، فرسودگی، اثربخشی اقدامات تعمیر و نگهداری و راندمان تست‌ها باشند. با این حال در مطالعات قبلی به اثر تخریب تدریجی تست‌ها بر روی نرخ خرابی تجهیزات ایمنی در حالت آماده باش و اثر بخشی اقدامات نگهداری بر این اقدام تخریبی پرداخته نشده است. با این حال، واضح است که با افزایش سطح تنش، مقدار بازه احتمال شکست (Chance failure) منحنی وان حمامی (Bathtub) مربوط به تجهیزات کاهش می‌یابد و فرسودگی زودرس رخ می‌دهد. بنابراین، به منظور به حداکثر رساندن قابلیت اطمینان تجهیزات ایمنی، لازم است که عوامل استرس‌زا مانند محیط‌های عملیاتی سخت یا تقاضاهای مکرر به حداقل مقدار ممکن کاهش یابند [۱۸]. تخریب تدریجی ناشی از تست به عنوان یک موضوع حائز اهمیت شناخته شده است. بنابراین این اثرات تست باید به عنوان بخشی از فرآیند تصمیم‌گیری مربوط به سیاست‌های نگهداری تجهیزات ایمنی در حالت آماده باش در طول عمر NPP ارزیابی شوند [2, 3].

این پژوهش بر سهم عدم قابلیت اطمینان مربوط به حالت آماده باش تجهیزات ایمنی متمرکز شده است و یک مدل عدم دسترس پذیری وابسته به عمر برای تجهیزات ایمنی در وضعیت آماده باش پیشنهاد می‌کند. این مدل به صراحت به تمام جنبه‌های اطلاعات فرسودگی، از جمله تعداد تست‌ها و تخریب تدریجی ناشی از تست‌ها، خرابی مربوط به زمان در وضعیت آماده باش، زمان سپری شده از نصب، اثربخشی فعالیت‌های تعمیر و نگهداری مربوط به تجهیز ایمنی را به صورت یکپارچه شامل می‌شود. همچنین مدل حاصل شده با سایر مدل‌های موجود مقایسه می‌گردد. به عنوان کاربرد، مدل عدم دسترس پذیری پیشنهادی تجهیزات ایمنی در مدل‌های PSA بکار گرفته می‌شود و با سایر مدل‌های مختلف عدم دسترس پذیری مقایسه می‌گردد. همچنین این مقایسه شامل ارزیابی عدم دسترس پذیری یک سیستم تزریق فشار بالا (HPIS) موجود در راکتور آبی تحت فشار VVER/1000-V446، شامل تجهیزات MOV و MDP، با استفاده از مدل درخت خطا (Fault Tree) نیز می‌باشد. علاوه بر این، کمیت اندازه‌گیری ریسک نیروگاه، یعنی CDF، بر اساس عدم دسترس پذیری سیستم HPIS در رویداد ترکیدگی تیوب‌های مولد بخار (SGTR) توسط مدل درخت رویداد (ET) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

انباشته شدن این اثرات تجمعی باعث افزایش عدم دسترس پذیری تجهیزات و در نتیجه عدم دسترس پذیری سیستم ایمنی در اجرای عملکرد مربوطه می‌گردد. بنابراین، توانایی نیروگاه در جلوگیری یا کاهش دادن اثرات حادثه، کاهش می‌یابد [۱-۳].

در شناسایی عوامل اصلی ریسک نیروگاه‌های هسته‌ای، مدل‌سازی ارزیابی ایمنی احتمالاتی (PSA) به طور مداوم در تعیین معیار ریسک، به عنوان مثال فرکانس آسیب به قلب (CDF)، بکار گرفته می‌شود. همچنین، PSA یک ابزار ضروری برای ارزیابی کمی تأثیر پذیری ریسک از مشخصات فنی نیروگاه می‌باشد که محدودیت‌ها و شرایط عملکرد نیروگاه هسته‌ای (NPP) و تجهیزات مربوطه را در طول عمر NPP تعیین می‌کند [۱، ۴، ۵]. مدل‌ها و داده‌های PSA استاندارد به صراحت به تأثیر اقدامات TS و فرسودگی تجهیزات نمی‌پردازند، بطوریکه این عوامل می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر نتیجه‌گیری‌ها داشته باشند و در نتیجه به عدم قطعیت‌های قابل توجه در نتایج منجر شوند، به‌ویژه زمانی که NPP‌ها برای مدت زمان طولانی مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۴]. بنابراین، به منظور پرداختن به مسائل ذکر شده، بسیاری از پژوهش‌ها، مدل‌های قابلیت اطمینان و عدم دسترس پذیری تجهیزات به گونه‌ای توسعه داده شده‌اند که به صراحت الزامات TS و فرسودگی تجهیزات را شامل شده‌اند.

برای تجهیزاتی که به صورت دوره‌ای تحت سیاست‌های تعمیر و نگهداری معمول قرار می‌گیرند، مدل‌های عدم دسترس پذیری وابسته به زمان به صورتی توسعه داده شده‌اند که فرسودگی در آن‌ها با توزیع احتمال خرابی مشخص شده است. این مدل‌ها بر اساس این فرض شکل گرفته‌اند که خرابی‌های ناشی از تست، فرسودگی تجهیزات را تحت تأثیر قرار نمی‌دهند [۶، ۷]. انواع دیگری از مدل‌های عدم دسترس پذیری وابسته به زمان و بازگشتی توسعه داده شده‌اند، که در آن‌ها نرخ‌های خرابی تجهیزات در حالت آماده‌باش به صورت مقادیر ثابت در نظر گرفته شده‌اند و اثرات تخریب تدریجی ناشی از تست و فرسودگی را شامل نمی‌شود [۸-۱۲].

جستجو برای مدل‌های عدم دسترس پذیری تجهیزاتی که به صورت دوره‌ای تست می‌شوند و کمی‌سازی اثرات نامطلوب تست‌ها و فرسودگی بر ریسک در مراجع [۲، ۳] آغاز شده است. این مراجع با در نظر گرفتن مفهوم اثر بخشی بر ریسک (risk-effectiveness)، مدل عدم دسترس پذیری را توسعه دادند که اثرات فرسودگی و تست تجهیزات را شامل شده است. مدل عدم دسترس پذیری تجهیزات شامل فرسودگی‌های خطی و ویبال (Weibull) که به صورت متوالی و متناوب تست می‌شوند نیز توسعه داده شده است [۱۳]. نوعی دیگر از مدل‌های عدم دسترس پذیری تجهیزات ایمنی توسعه داده شده، مدل‌های RAM (Reliability, Availability and Maintenance) می‌باشند. ویژگی اصلی این مدل‌ها این است که نرخ خرابی تجهیزات در حالت آماده باش به صراحت اثرات فرسودگی، اثربخشی تعمیر و نگهداری

## مدل احتمال خرابی به ازای تقاضا با در نظر داشتن استرس ناشی از تقاضا و اثربخشی اقدامات نگهداری

بر اساس معادله (2)، احتمال خرابی به ازای تقاضا برای یک تجهیز در وضعیت آماده باش، که آماده انجام یک عملکرد ایمنی در صورت تقاضا است، تنها به تعداد تقاضا بستگی دارد. این تقاضاها شامل تست های نظارتی برنامه ریزی شده و تست های عملکردی موجود در مشخصات فنی NPP، تست های برنامه ریزی نشده پس از تعمیر و نگهداری اصلاحی و تقاضاهای عملیاتی می باشند. مهم ترین سهم این تقاضاها مربوط به تست های نظارتی اجرا شوند بر روی تجهیز ایمنی می باشد [۱۹].

با فرض ثابت بودن بازه زمانی تست های نظارتی و اقدامات نگهداری، به ترتیب برابر با T و M، به عنوان مبنایی منظم برای اجرای اقدامات تست و نگهداری پیشگیرانه، احتمال خرابی وابسته به زمان مربوط به خرابی ناشی از تقاضا پس از اجرای m اقدام تعمیر و نگهداری (Proportional Age Setback) PAS و n تست اجرا شده، بر اساس مدل پیشنهادی در [۱۹]، به صورت زیر فرمول بندی می شود:

$$\rho(n, m, \varepsilon_D) = \rho_0 + \rho_0 p_1 \frac{M(1 - \varepsilon_D)}{T - \varepsilon_D} \cdot \{1 - (1 - \varepsilon_D)^m\} \quad (4)$$

بطوریکه فاکتور  $\varepsilon_D \in [0, 1]$  بیانگر اثر بخشی اقدام نگهداری می باشد.

## مدل نرخ خرابی در وضعیت آماده باش

### اعمال استرس های تقاضا و در وضعیت آماده باش

تخریب تدریجی تجهیزات ایمنی ممکن است به دو علت اساسی روی دهد. علت اول، طول مدت زمان سپری شده بعد از نصب تجهیز می تواند شرایط تجهیز را بدتر کند. وضعیت تجهیزات نصب شده از سال ها پیش با مواردی که اخیراً نصب شده اند متفاوت است. "استرس در وضعیت آماده باش"، یعنی فرسودگی، منجر به این تفاوت می شود و در طول زمان انباشته می گردد. علت دوم، تست ها یا عملیات های متعددی است که ممکن است تجهیزات را تخریب کند. این امکان وجود دارد که وضعیت تجهیز به ازای هر تقاضا زوال یابد و بدتر شود. وضعیت تجهیزیه که بارها تست شده یا در شرایط تقاضا عملیاتی شده است، با تجهیزیه که فقط یک بار تست شده است متفاوت است. "استرس مربوط به تست" باعث این تفاوت می شود و این نوع فرسودگی با انجام تست ها انباشته می شود. بنابراین برای ارزیابی نرخ خرابی یا عدم دسترس پذیری تجهیز ایمنی، که در بردارنده تخریب های تدریجی ناشی از تست پس از یک دوره طولانی می باشند، باید هر دو سهم تخریب تدریجی در نظر گرفته شود. زیرا اثرات فرسودگی و تخریب تدریجی قابل صرف نظر کردن نمی باشند. مدل های مختلفی برای قابلیت

## مدل عدم دسترسی بر اساس مفهوم استرس بر تجهیز

اثرات فرسودگی و تخریب تدریجی ناشی از تست ها به ترتیب توسط دو نوع استرس، یعنی تنش های در وضعیت آماده باش و تقاضا، در نظر گرفته می شوند. استرس در وضعیت آماده باش یا وابسته به زمان، تجهیز در وضعیت آماده باش را تحت تاثیر قرار می دهد. در حالیکه استرس مربوط به تقاضا یا وابسته به سیکل (Cycle) تنها زمانی اعمال می شود که از تجهیز فعال شود یا در حال فعالیت باشد. به طور کلی، تجهیزاتی که در وضعیت آماده باش قرار دارند و به منظور تشخیص خرابی های پنهان به صورت دوره ای تست می شوند، ترکیب هر دو نوع استرس باعث تخریب تدریجی تجهیز و در نهایت خرابی کامل آن می گردد [۲، ۳] بر اساس مکانیسم های تخریب تدریجی تجهیز ناشی از تست و فرسودگی، یک پایه سازمان یافته مناسب برای مدل سازی سهم های عدم دسترس پذیری تجهیز در وضعیت آماده باش، یعنی احتمال خرابی به ازای تقاضا و نرخ خرابی وابسته به زمان، توسط کیم و همکاران پیشنهاد شده است [۲، ۳]. این مدل عدم دسترس پذیری مربوط به تجهیز ایمنی، که در بر دارنده اثرات فرسودگی و اثرات نامطلوب تست می باشد به صورت زیر نمایش داده می شود:

$$q(t) = \rho(n) + \int_{nT}^{nT+t} \lambda(n, t') dt' \quad \text{for } t \in [0, T] \quad (1)$$

به دلیل عدم دسترسی به داده های مورد نیاز، پارامترهای تخریب تدریجی  $\rho(n)$  و  $\lambda(n, t')$  به صورت خطی پیشنهاد شده است و در رابطه (۲) و (۳) نشان داده شده اند. احتمال خرابی به ازای تقاضا،  $\rho(n)$ ، تنها تحت تاثیر تست های مکرر قرار می گیرد و به عنوان تابعی از تعداد تست های انجام شده،  $n$ ، مدل سازی می شود.

$$\rho(n) = \rho_0 + \rho_0 p_1 n \quad (2)$$

فرسودگی پیشرونده در نرخ خرابی در وضعیت آماده باش تحت تاثیر تعداد تست ها،  $n$ ، و همچنین زمان تقویمی،  $t'$ ، قرار می گیرد و به صورت زیر مدل شده است.

$$\lambda(n, t') = \lambda_0 + \lambda_0 p_2 n + at' \quad (3)$$

بطوریکه:

$n$	= تعداد تست های انجام شده بر روی تجهیز در زمان تقویمی
$t'$	= زمان سپری شده از آخرین تست
$\rho_0$	= خرابی به جای مانده به ازای تقاضا
$T$	= بازه زمانی اجرای تست های بازرسی
$p_1$	= فاکتور تخریب تدریجی تست مربوط به خرابی های ناشی از تقاضا
$p_2$	= فاکتور تخریب تدریجی تست مربوط به خرابی های در وضعیت آماده باش
$\lambda_0$	= نرخ خرابی به جای مانده در وضعیت آماده باش
$\alpha$	= فاکتور فرسودگی

$$\lambda_{PM_1}(n, t, \varepsilon_S) = \lambda_0 + \left( \alpha \cdot (T_{PM_1}) + \lambda_0 \cdot p_2 \left[ \frac{T_{PM_1}}{T} \right] \right) (1 - \varepsilon_S) + \alpha \cdot (t - T_{PM_1}) + \lambda_0 \cdot p_2 \cdot \left[ \frac{t - T_{PM_1}}{T} \right] \quad (10)$$

بعد از اجرای دومین اقدام نگهداری پیشگیرانه، یعنی  $t \in [T_{PM_2}, T_{PM_3})$ ، نرخ خرابی تجهیز به صورت رابطه (۱۱) بیان می گردد:

$$(n, t, \varepsilon_S) = \lambda_0 + \left( \alpha \cdot (T_{PM_1}) + \lambda_0 \cdot p_2 \left[ \frac{T_{PM_1}}{T} \right] \right) (1 - \varepsilon_S)^2 + \left( \alpha \cdot (T_{PM_2} - T_{PM_1}) + \lambda_0 \cdot p_2 \left[ \frac{T_{PM_2} - T_{PM_1}}{T} \right] \right) (1 - \varepsilon_S) + \alpha \cdot (t - T_{PM_2}) + \lambda_0 \cdot p_2 \cdot \left[ \frac{t - T_{PM_2}}{T} \right] \quad (11)$$

بعد از اجرای سومین اقدام نگهداری پیشگیرانه، یعنی  $t \in [T_{PM_3}, T_{PM_4})$ ، نرخ خرابی تجهیز به صورت رابطه (۱۲) بیان می گردد:

$$\lambda_{PM_3}(n, t, \varepsilon_S) = \lambda_0 + \left( \alpha \cdot (T_{M_1}) + \lambda_0 \cdot p_2 \left[ \frac{T_{PM_1}}{T} \right] \right) (1 - \varepsilon_S)^3 + \left( \alpha \cdot (T_{M_2} - T_{M_1}) + \lambda_0 \cdot p_2 \left[ \frac{T_{PM_2} - T_{PM_1}}{T} \right] \right) (1 - \varepsilon_S)^2 + \left( \alpha \cdot (T_{M_3} - T_{M_2}) + \lambda_0 \cdot p_2 \cdot \left[ \frac{T_{PM_3} - T_{PM_2}}{T} \right] \right) (1 - \varepsilon_S) + \alpha \cdot (t - T_{M_3}) + \lambda_0 \cdot p_2 \cdot \left[ \frac{t - T_{PM_3}}{T} \right] \quad (12)$$

با فرض یک بازه نگهداری ثابت برابر  $M$  برای اجرای اقدامات نگهداری پیشگیرانه، رابطه (۱۲) را می توان به صورت زیر ساده کرد:

$$\lambda_{PM_3}(n, t, \varepsilon_S) = \lambda_0 + \left( \alpha \cdot (M) + \lambda_0 \cdot p_2 \left[ \frac{M}{T} \right] \right) (1 - \varepsilon_S)^3 + \left( \alpha \cdot (M) + \lambda_0 \cdot p_2 \left[ \frac{M}{T} \right] \right) (1 - \varepsilon_S)^2 + \left( \alpha \cdot (M) + \lambda_0 \cdot p_2 \left[ \frac{M}{T} \right] \right) (1 - \varepsilon_S) + \alpha \cdot (t - T_{PM_3}) + \lambda_0 \cdot p_2 \cdot \left[ \frac{t - T_{PM_3}}{T} \right] \quad (13)$$

اطمینان تجهیز که اثرات فرسودگی را شامل می شود در پژوهش ها ارائه شده است، مانند مدل های خطی، ویبال، نمایی [۱، ۳، ۲۰]. جامع ترین مدل نرخ خرابی مربوط به زمان آماده باش تجهیز را می توان به عنوان تابعی از زمان سپری شده،  $t$  و تعداد تست ها،  $n$  به صورت رابطه (۵) فرمول بندی کرد.

$$\lambda(f(t), w(t)) = \lambda_0 + \lambda_0 \cdot f_2(t)^{\beta_1} + \alpha \cdot w(t)^{\beta_2} \quad (5)$$

به دلیل عدم دسترسی به داده های مورد نیاز، پارامترهای تاثیر تست و فرسودگی، به ترتیب  $\beta_1$  و  $\beta_2$ ، برابر ۱ در نظر گرفته می شوند [۲، ۳، ۱۹]. بنابراین، این مقاله فرض می کند که نرخ خرابی رفتار خطی با فرسودگی ناشی از سپری شدن زمان و تخریب تدریجی ناشی از تعداد تست ها بر روی تجهیز دارد و ساده ترین مدل قابلیت اطمینان وابسته به عمر فراهم می گردد. بطوریکه در رابطه (۵)،  $f_2(t)$  یک تابع تخریب تدریجی ناشی از استرس های مربوط به تقاضا است و به تعداد تمام تقاضاها بستگی دارد. با فرض اینکه تمامی تقاضاها، ضریب تخریب تدریجی یکسان و برابری را دارا می باشند، تابع تخریب تدریجی را می توان به صورت رابطه (۶) نشان داد:

$$f_2(t) = p_2 n(t) \quad (6)$$

و  $w(t)$  عمر تجهیز می باشد و تکامل عمر تجهیز توسط رابطه (۷) تعیین می شود

$$w(t) = w_m^+ + (t - t_m) \quad (7)$$

بطوریکه  $w_m^+$  عمر تجهیز بعد از اجرای  $m$  امین اقدام نگهداری در زمان  $t_m$  می باشد و  $t$  زمان تقویمی سپری شده بعد از زمان نصب تجهیز می باشد. بنابراین، مدل نرخ خرابی در وضعیت آماده باش را می توان به صورت رابطه (۸) بیان کرد:

$$\lambda(n, t) = \lambda_0 + \lambda_0 \cdot p_2 n(t) + \alpha \cdot w_m^+ + \alpha \cdot (t - t_m) \quad (8)$$

### اعمال اثر بخشی نگهداری

همانطور که قبلا ذکر شد، مدل نگهداری PAS به منظور نمایش اثر بخشی اقدامات نگهداری بکار گرفته می شود. اقدامات تعمیر و نگهداری به تدریج شیب نرخ خرابی وابسته به عمر،  $\lambda(n, t)$ ، را کاهش می دهند. تاثیر مدل نگهداری پیشگیرانه باید در رابطه (۸)، به عنوان رابطه پایه، نشان داده شود. بنابراین تا پیش از اولین اقدام نگهداری،  $t \in [0, T_{PM_1})$ ، نرخ خرابی تجهیز به صورت رابطه (۹) بیان می گردد:

$$\lambda_{PM_0}(n, t) = \lambda_0 + \lambda_0 \cdot p_2 \left[ \frac{t}{T} \right] + \alpha \cdot (t) \quad (9)$$

بطوریکه  $n = \left[ \frac{t}{T} \right]$  صرفا شامل تعداد تست های نظارتی انجام شده بر روی تجهیز ایمنی تا زمان  $t$  و  $[x]$  باشد تابع floor می باشد. پس از اجرای اولین اقدام نگهداری پیشگیرانه، یعنی  $t \in [T_{PM_1}, T_{PM_2})$ ، نرخ خرابی تجهیز به صورت رابطه (۱۰) بیان می شود:

توسعه داده شده در پژوهش ها که در بر دارنده اثرات فرسودگی و تخریب تدریجی ناشی از تست می باشند دو مدل معرفی می گردد. این مدل ها که به ترتیب اثر بخشی اقدامات نگهداری [۲، ۳، ۲۱] و تخریب تدریجی ناشی از تست [۱، ۴، ۱۴، ۱۷، ۱۹] را در نظر نمی گیرند. برای سادگی با تحت عناوین Case 1 و Case 2 معرفی می شوند.

Case 1 اثرات تخریب تدریجی و فرسودگی ناشی از تست ها را بر روی احتمال خرابی به ازای تقاضا و نرخ خرابی مربوط به وضعیت آماده باش در نظر می گیرد، اما اثر بخشی اقدامات تعمیر و نگهداری را شامل نمی شود.

Case 2 اثرات اقدامات تعمیر و نگهداری را بر هر دو سهم عدم دسترس پذیری، یعنی خرابی ناشی از تقاضا و خرابی در وضعیت آماده باش در نظر می گیرد. اما، در این مورد، اثرات تخریب تدریجی ناشی از تست فقط در اولین سهم، یعنی خرابی ناشی از تقاضا، در نظر گرفته می شود و همچنان در نرخ خرابی در وضعیت آماده باش نادیده گرفته شده است. Case های معرفی شده، ویژگی ها و مدل های ریاضی آنها در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: مقایسه مدل های عدم دسترس پذیری تجهیز ایمنی

مشخصات	سهم عدم دسترس پذیری تجهیز		
	استرس ناشی از تقاضا	استرس ناشی از وضعیت در حالت آماده باش	
	$\rho(n)$	$\int \lambda(n, t') dt'$	
Case 1 ([2, 3, 21])	$p_1, p_2, \alpha$	$\rho_0 + \rho_0 p_1 \left[ \frac{t}{T} \right]$	$.t \lambda_0 + \lambda_0 p_2 \left[ \frac{t}{T} \right] + \frac{\alpha}{2} \cdot \left( 2 \left[ \frac{t}{T} \right] \cdot T \cdot t - t^2 \right)$
Case 2 ([1, 4, 14, 17, 19, 22])	$p_1, \alpha, \varepsilon_D, \varepsilon_S$	$\frac{\rho_0 + \frac{M(1-\varepsilon_D)}{T} \cdot \{1 - (1 - \varepsilon_D)^m\}}{\varepsilon_D} + \rho_0 p_1 \left[ \frac{t}{T} \right]$	$\lambda_0 + \alpha \cdot (t - m \cdot M) + \alpha \cdot [m \cdot M - \sum_{k=0}^{m-1} (1 - \varepsilon_S)^k \varepsilon_S (m - k) M]$
Case 3	$p_1, p_2, \alpha, \varepsilon_D, \varepsilon_S$	$\frac{\rho_0 + \frac{M(1-\varepsilon_D)}{T} \cdot \{1 - (1 - \varepsilon_D)^m\}}{\varepsilon_D} + \rho_0 p_1 \left[ \frac{t}{T} \right]$	$. \lambda_0 t + \lambda_0 p_2 \cdot \frac{M}{T} \cdot \frac{(1-\varepsilon_S)}{\varepsilon_S} \cdot \{1 - (1 - \varepsilon_S)^m\} \cdot t + \alpha \cdot M \cdot \frac{(1-\varepsilon_S)}{\varepsilon_S} \cdot \{1 - (1 - \varepsilon_S)^m\} \cdot t + p_2 \cdot \left[ \frac{t^2 + 2t \cdot \left[ \frac{t}{T} \right] \cdot T - m \cdot M \cdot t}{2} \right] + \alpha \cdot \left( \frac{t^2 + 2t \cdot \left[ \frac{t}{T} \right] \cdot T}{2} - m \cdot M \cdot t \right)$

بعد از اجرای  $m$  امین اقدام نگهداری پیشگیرانه،  $t \in (T_{PMm}, T_{PMm+1})$ ، نرخ خرابی تجهیز شامل اثر بخشی اقدامات نگهداری به صورت رابطه (۱۴) بیان می شود

$$\lambda_{PMm}(n, t, \varepsilon_S) = \lambda_0 + \sum_{j=1}^m \left( \alpha \cdot (M) + \lambda_0 \cdot p_2 \left[ \frac{M}{T} \right] \right) (1 - \varepsilon_S)^j + \alpha \cdot (t - T_{PMm}) + \lambda_0 \cdot p_2 \cdot \left[ \frac{t - T_{PMm}}{T} \right] = \lambda_0 + \sum_{j=0}^{m-1} \left( \alpha \cdot (M) + \lambda_0 \cdot p_2 \left[ \frac{M}{T} \right] \right) (1 - \varepsilon_S)^{j+1} + \alpha \cdot (t - T_{PMm}) + \lambda_0 \cdot p_2 \cdot \left[ \frac{t - T_{PMm}}{T} \right] = \lambda_0 + \left( \alpha \cdot (M) + \lambda_0 \cdot p_2 \left[ \frac{M}{T} \right] \right) (1 - \varepsilon_S)^{\sum_{j=0}^{m-1} (1 - \varepsilon_S)^j} + \alpha \cdot (t - T_{PMm}) + \lambda_0 \cdot p_2 \cdot \left[ \frac{t - T_{PMm}}{T} \right]$$

ترم جمع سیگما در رابطه (۱۴) متناظر با یک سری هندسی به ترتیب با جمله اول و قدر نسبت، ۱ و  $(1 - \varepsilon_S)$ ، می باشد. بنابراین می توان رابطه (14) را ساده و به صورت رابطه (۱۵) نمایش داد.

$$\lambda_{PMm}(n, t, \varepsilon_S) = \lambda_0 + \left( \alpha \cdot (M) + \lambda_0 \cdot p_2 \left[ \frac{M}{T} \right] \right) \cdot \frac{(1-\varepsilon_S)}{\varepsilon_S} \cdot [1 - (1 - \varepsilon_S)^m] + \alpha \cdot (t - T_{PMm}) + \lambda_0 \cdot p_2 \cdot \left[ \frac{t - T_{PMm}}{T} \right]$$

### عدم دسترس پذیری وابسته به زمان یک تجهیز ایمنی

بر اساس رابطه (1)، احتمال خرابی وابسته به زمان یک تجهیز ایمنی در وضعیت آماده باش به صورت ترکیبی از احتمال خرابی ناشی از تقاضا و انتگرال نرخ خرابی در وضعیت آماده باش مدل سازی می شود. با جایگذاری روابط (۴) و (15) در رابطه (۱)، جامع ترین مدل عدم دسترس پذیری وابسته به زمان تجهیز که اثرات فرسودگی، تخریب تدریجی ناشی از تست و اثر بخشی اقدامات نگهداری را در بر دارد به صورت زیر حاصل می شود

$$q(n, t, m, \varepsilon) = \rho_0 + \rho_0 p_1 \frac{M(1-\varepsilon_D)}{T} \cdot \{1 - (1 - \varepsilon_D)^m\} + \rho_0 p_1 \left[ \frac{t}{T} \right] (1 - \varepsilon_D)^m + \lambda_0 t + \lambda_0 p_2 \cdot \frac{M}{T} \cdot \frac{(1-\varepsilon_S)}{\varepsilon_S} \cdot \{1 - (1 - \varepsilon_S)^m\} \cdot t + \alpha \cdot M \cdot \frac{(1-\varepsilon_S)}{\varepsilon_S} \cdot \{1 - (1 - \varepsilon_S)^m\} \cdot t + \lambda_0 \cdot p_2 \cdot \left[ \frac{t^2 + 2t \cdot \left[ \frac{t}{T} \right] \cdot T - m \cdot M \cdot t}{2} \right] + \alpha \cdot \left( \frac{t^2 + 2t \cdot \left[ \frac{t}{T} \right] \cdot T}{2} - m \cdot M \cdot t \right)$$

برای سادگی، مدل پیشنهادی تحت عنوان Case 3 نامگذاری می شود. به منظور مقایسه مدل های مختلف عدم دسترس پذیری تجهیز ایمنی

می دهد بطوریکه این داده ها از PSA موجود راکتور هسته ای VVER/1000-V446 استخراج شده اند. علاوه بر این، جدول ۲ شامل بازه های زمانی تست و نگهداری نیز می باشد که در مشخصات فنی فعلی این راکتور هسته ای موجود است.

**جدول ۲:** داده های مربوط به نرخ خرابی، بازه های زمانی تست و نگهداری استخراج شده از PSA و TS نیروگاه هسته ای VVER/1000-V446

No.	کد تجهیز	نوع تجهیز	نرخ خرابی ( $h^{-1}\lambda_0$ )	T (h)	M (h)	رویداد پایه
1	TH15D001 PMS	MDP	2.35E-6	672	8064	Fail to start
2	TH15S003 VMO	MOV	1.78E-6			Fail to open
3	TH15S007 VMO	MOV				Fail to open
4	TH15S011 VMO	MOV				Fail to close
5	TH15S012 VMO	MOV	Fail to close			

جدول ۳ مقادیر ثابت پارامترهای مورد نیاز در مدل پیشنهادی را برای تجهیزات اصلی یک شاخه HPIS نشان می دهد. این پارامترها از مراجع [۲۲، ۲۴-۲۶] استخراج شده اند. در این پژوهش، با در نظر گرفتن روش پیشنهاد شده در مرجع [۲۵] مقدار اثر بخشی اقدامات نگهداری، یعنی  $\varepsilon_D, \varepsilon_S$ ، برابر ۰.۶ در نظر گرفته شده است.

**جدول ۳:** پارامترهای قابلیت اطمینان مربوط به تجهیزات

تجهیز	$\rho_0(-)$	$\alpha(h^{-2})$	$p_1(-)$	$p_2(-)$	$\varepsilon_D(-)$	$\varepsilon_S(-)$
MD P	0.53E-3	0.22E-10	0.0107	0.004	0.6	0.6
MO V	6.42E-3	3.42E-10	0.0138	0.138	0.6	0.6

همانطور که قبلاً ذکر شد، PSA استاندارد سطح ۱ نیروگاه VVER/1000-V446 در وضعیت عملیاتی تمام توان (Full Power) برای ارزیابی معیار ریسک CDF بکار گرفته شده است. این معیار ریسک مربوط به سناریوهای حوادث ناشی از رویداد آغازگر SGTR توسط مدل ET موجود در PSA موجود ارزیابی می شود. از این رو، با اعمال این رویکرد، CDF ناشی از رویداد آغازگر SGTR راکتور هسته ای VVER/1000-V446 به عنوان تابعی از اثرات فرسودگی، تخریب تدریجی ناشی از تست و سیاست های تعمیر و نگهداری تجهیزات ایمنی در وضعیت آماده باش حاصل می شود.

## متوسط مقدار عدم دسترس پذیری یک تجهیز ایمنی در وضعیت آماده باش

متوسط مقدار عدم دسترس پذیری در بازه زمانی بین دو تست متوالی، برای مثال بازه زمانی n امین تست برابر است با زمان بین  $nT$  و  $(n+1)T$ ، از طریق رابطه (۱۷) محاسبه می شود بطوریکه

$$N = \frac{M}{T} \text{ و } n=1,2,3, \dots, N$$

$$\bar{q}(n, m, \varepsilon) = \frac{1}{T} \int_{nT}^{(n+1)T} q(n, t, m, \varepsilon) dt \quad (17)$$

در نهایت، به عنوان یک معیار موثر در طول یک چرخه کاری، یعنی بین دو چرخه متوالی بارگذاری سوخت، متوسط عدم دسترس پذیری تجهیزات را می توان به صورت رابطه (۱۸) تخمین زد:

$$\bar{q}(m, \varepsilon) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \bar{q}(n, m, \varepsilon) \quad (18)$$

بطوریکه N تعداد کل تست های اجرا شده در طول یک بازه نگهداری پیشگیرانه می باشد. این مدل پیشنهادی را می توان در یک مدل PSA سطح ۱ اعمال کرد و نتایج معیار ریسک نیروگاه، برای مثال CDF، را به گونه ای فراهم کرد که تاثیر عواملی همچون اثرات فرسودگی، تخریب تدریجی ناشی از تست و اثربخشی تعمیر و نگهداری بر روی تجهیز در وضعیت آماده باش در آن در نظر گرفته شده است.

## مطالعه موردی

### توصیف مسئله

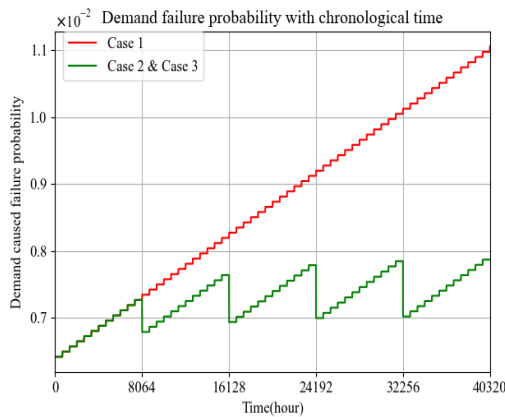
هر سه مدل عدم دسترس پذیری تجهیز، یعنی Cases 1, 2, 3، عمومی هستند و برای هر نوع تجهیز در وضعیت آماده باش قابل استفاده می باشند. به منظور سادگی در بحث درباره نتایج و اجرای یک محاسبه واقعی، این مدل ها فقط برای کمی سازی رویدادهای پایه مربوط به تجهیزات اصلی HPIS مربوط به سیستم خنک کننده اضطراری قلب (ECCS) راکتور هسته ای VVER/1000-V446 در طول پنج چرخه بارگذاری سوخت بکار گرفته می شوند. بر اساس PSA استاندارد سطح ۱ نیروگاه VVER/1000-V446، عدم دسترس پذیری HPIS به چهار حالت خرابی جداگانه، شامل عدم دسترس پذیری تجهیزات، خرابی های با عامل مشترک (CCF)، خطاهای انسانی و نرم افزاری، مرتبط شده است. در این مقاله، عدم دسترس پذیری HPIS با مدل درخت خطای مدل سازی می شود، بطوریکه عدم دسترس پذیری تجهیزات ناشی از اقدامات تست و خرابی های تصادفی را در نظر می گیرد [۲۳]. همچنین، از نظر ریسک، تاثیر مغایر ایمنی تست های نظارتی بیش از حد، یک نگرانی مهم است که باید به عنوان بینشی در تصمیم گیری کمی سازی شود. بنابراین مدل درخت رویداد، این اثر نامطلوب را در معیار ریسک نیروگاه، یعنی CDF، منعکس می کند. جدول ۲ مقادیر نرخ خرابی را برای یک شاخه HPIS، شامل اجزای اصلی MDP و MOV، نشان



## نتایج

این بخش نتایج پیاده‌سازی مدل پیشنهادی و سایر مدل‌های موجود در ارزیابی عدم دسترس پذیری تجهیزات MDP و MOV مربوط به HPIS را ارائه می‌کند. نتایج شامل احتمال خرابی ناشی از تقاضا وابسته به زمان، نرخ خرابی در وضعیت آماده باش وابسته به زمان، متوسط عدم دسترس پذیری در طول دو تست و دو اقدام نگهداری پیشگیرانه متوالی می‌باشد. در ادامه، عدم دسترس پذیری HPIS و معیار ریسک CDF توسط مدل‌های مختلف ارزیابی و مقایسه می‌گردند.

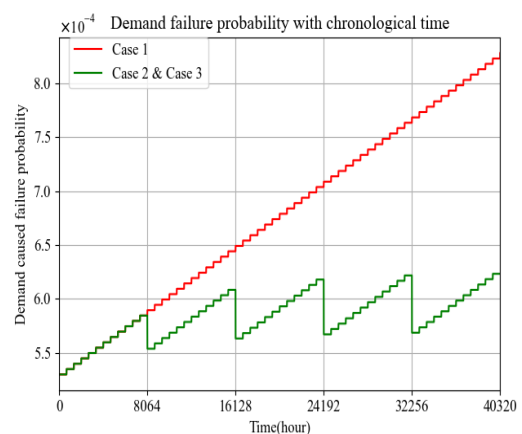
شکل ۱ نشان می‌دهد که برای هر دو تجهیز، MOV و MDP، احتمال خرابی ناشی از تقاضا در طول زمان برای Case 1 همواره در حال افزایش و برای Case 2 و Case 3 رفتار مجانبی دارد. رشد احتمال خرابی ناشی از تقاضا مربوط به هر دو تجهیز در تمامی Case ها صرفاً از اثرات تخریب تدریجی ناشی می‌شود و فرسودگی تجهیزات در این سهم از احتمال خرابی نقشی ندارد. تفاوت در رفتار این Case ها به این دلیل است که در Case 1 هیچ گونه فعالیت تعمیرات و نگهداری انجام نمی‌گردد در حالی که در Case 2 و Case 3 فعالیت های تعمیر و نگهداری در هر دوره بارگذاری سوخت نیروگاه انجام می‌شود. در این شکل مشاهده می‌شود که تا زمان اجرای اولین اقدام تعمیر و نگهداری، تمامی Case ها رفتار پیوسته در حال افزایش مشابهی دارند. همچنین Case 2 و Case 3 همواره رفتار یکسانی دارند زیرا مدل‌های آنها یکسان می‌باشد و به علت اجرای اقدامات نگهداری پیشگیرانه دارای رفتاری مجانبی می‌باشند. بنابراین، می‌توان این گونه تفسیر کرد که اقدامات تعمیر و نگهداری مشخص و ثابت، قادر است تا تخریب تدریجی ناشی از تقاضا بر تجهیز را در بلندمدت در یک سطح ثابت باقی نگه دارد.



(b) MOV

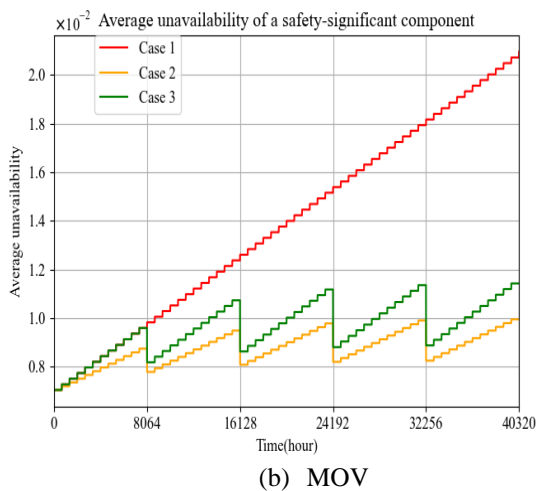
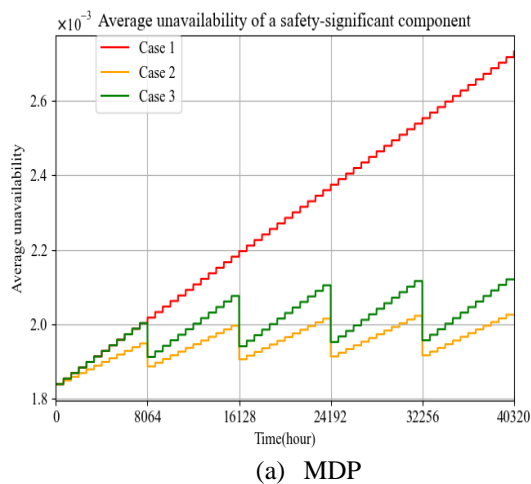
شکل ۱: احتمال خرابی به ازای تقاضا

شکل ۲ رفتارهای نرخ خرابی در وضعیت آماده باش هر دو تجهیز، MOV و MDP، را در طول زمان نشان می‌دهد. در Case 1 به دلیل اینکه هیچ اقدام تعمیر و نگهداری بر روی تجهیزات انجام نمی‌شود، نرخ خرابی در وضعیت آماده باش در طول زمان در حال افزایش است. در حالی که در Case 2 و Case 3 به دلیل اجرای اقدامات تعمیر و نگهداری تعیین شده، نرخ خرابی در وضعیت آماده باش دارای رفتاری است که به طور یکنواخت در حال افزایش است و در نهایت به مقادیر مجانبی سوق می‌یابد. با توجه به مدل‌های خرابی در وضعیت آماده باش، تا اولین فعالیت تعمیر و نگهداری پیشگیرانه، Case 3 و Case 1 رفتارهای مشابهی دارند. اما در Case 2، توابع نرخ خرابی در وضعیت آماده باش در طول زمان بدون هیچ گونه تأثیر پذیری از تخریب تدریجی ناشی از تست رشد می‌یابند و این رفتارهای خطی را صرفاً از مدل فرسودگی خطی کسب می‌کنند. بنابراین، Case 2 نرخ خرابی مربوط در وضعیت آماده باش مربوط به هر دو تجهیز را کمتر از مقدار واقعی تخمین می‌زند. بنابراین، همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، واضح است که اثرات فرسودگی و تخریب تدریجی ناشی از تست قویا به یکدیگر وابسته و اثر هم افزایی دارند. در بین تمام Case ها، Case 3 کامل‌ترین مدل ممکن و قادر به پیش بینی واقعی‌ترین نرخ‌های خرابی در وضعیت آماده باش می‌باشد.



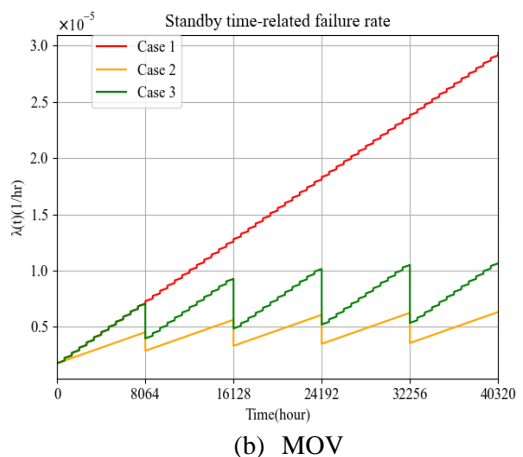
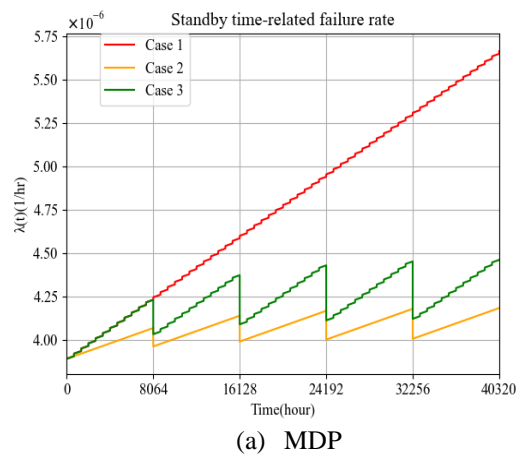
(a) MDP

دلیل اجرای اقدامات تعمیر و نگهداری، Case 3 دارای یک رفتار افزایشی یکنواخت می باشد که در نهایت به رفتار مجانبی تبدیل می شود. با مقایسه Case 2 و Case 3، به دلیل در نظر گرفتن سهم تخریب تدریجی ناشی از تست در نرخ خرابی در وضعیت آماده باش در Case 3، متوسط عدم دسترس پذیری در تمامی سیکل های کاری بیشتر از Case 2 می باشد. بنابراین، نادیده گرفتن اثر تخریب تدریجی ناشی از تست بر نرخ خرابی در وضعیت آماده باش می تواند منجر به خطای قابل توجه در برآورد متوسط عدم دسترس پذیری در سطح تجهیز گردد.



شکل ۳: متوسط عدم دسترس پذیری در طول دو تست متوالی

شکل ۴ متوسط عدم دسترس پذیری ارزیابی شده مربوط به MDP و MOV را در طول پنج چرخه کاری برای هر سه Case نشان می دهد. برای هر دو تجهیز، همانطور که انتظار می رود، بالاترین مقادیر عدم دسترس پذیری مربوط به Case 1 است، یعنی حالتی که در آن اجرای اقدامات تعمیر و نگهداری در طول دوره های بارگذاری سوخت انجام نمی گیرد. با توجه به شکل ها مشاهده می شود که قبل از انجام اولین اقدام تعمیر و نگهداری، متوسط عدم دسترس پذیری Case 1 برابر با Case 3 می باشد، در حالی که این مقدار در Case 2 کمتر تخمین



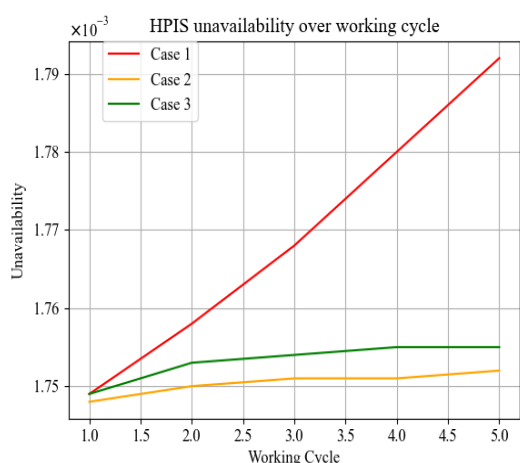
شکل ۲: نرخ خرابی در وضعیت آماده باش تجهیزات

برای یک برنامه اجرای اقدامات تعمیر و نگهداری ۳۳۶ روزه و تست های نظارتی ۲۸ روزه، شکل ۳ نتایج مربوط به رشد عدم دسترس پذیری MDP و MOV را در بازه زمانی تست های نظارت متوالی برای Case های مختلف نمایش می دهد. بیشترین مقادیر مربوط به متوسط عدم دسترس پذیری تجهیزات مربوط به Case 1 می باشد زیرا در این Case اجرای اقدامات تعمیر و نگهداری مستمر صورت نمی گیرد. با مشاهده رفتار متوسط عدم دسترس پذیری در Case 1 برای هر دو تجهیز MDP و MOV، می توان رشد پیوسته آنها را از مقادیر پایه ۰,۰۰۱۸ و ۰,۰۰۷۰ تا بیشینه مقادیر ۰,۰۰۲۷ و ۰,۰۲۰۹ در انتهای سیکل کاری پنجم مشاهده کرد. مقدار متوسط عدم دسترس پذیری در Case 2 که شامل سهم تخریب تدریجی ناشی از تست در نرخ خرابی در وضعیت آماده باش تجهیزات نمی شود، برابر با مقادیر متوسط عدم دسترس پذیری Case 2 و Case 3 تا انجام اولین تست در اولین بازه نگهداری می باشد. پس از آن، رفتار متوسط عدم دسترس پذیری Case 2 از موارد دیگر متمایز می شود، زیرا، در Case 2، اثر تخریب تدریجی ناشی از تست بر نرخ خرابی در وضعیت آماده باش نادیده گرفته شده است. همانطور که در شکل ۳ نشان داده شده است، Case 1 و Case 3 تا اجرای اولین اقدام تعمیر و نگهداری با هم تطابق کامل دارند. سپس به

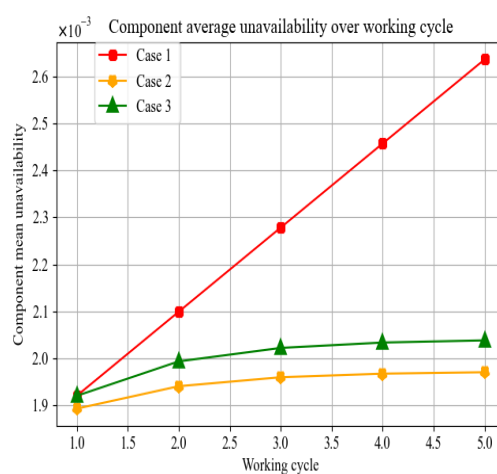


زده شده است، زیرا در این Case وجود اثرات تخریب تدریجی ناشی از تست صرف نظر شده است. با اجرای اقدامات تعمیر و نگهداری با مشخصه های ثابت، مانند دوره زمانی و اثربخشی نگهداری، رفتارهای مجانبی برای Case 2 و Case 3 حاصل می شود. این یک نتیجه بدیهی است، که وضعیت تجهیز را می توان با اجرای اقدامات تعمیر و نگهداری منظم بهبود بخشید. به عنوان مثال، در پایان سیکل کاری پنجم، مقادیر متوسط عدم دسترس پذیری ارائه شده توسط Case 2 و Case 3 برای MDP و MOV به ترتیب ۳،۴٪ و ۱۰،۳۷٪ تفاوت دارند. این اختلاف ناشی از در نظر گرفتن اثر تخریب تدریجی ناشی از تست بر نرخ خرابی در وضعیت آماده باش تجهیزات می باشد که در Case 2 از آن صرف نظر شده است.

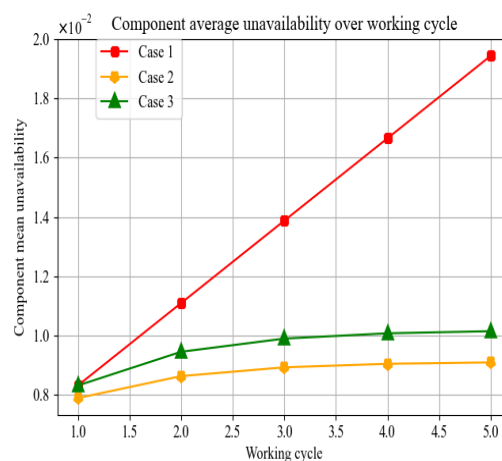
نیروگاه VVER1000/V446 بکار گرفته می شوند. بطوریکه مقادیر کمی مربوط به عدم دسترس پذیری تجهیز از مقادیر معمول موجود در PSA به مقادیری تغییر داده می شوند که صریحاً اثرات فرسودگی و تخریب تدریجی را شامل می شوند، یعنی Cases 1, 2, 3. شکل (a) - (a) رشد عدم دسترس پذیری HPIS مربوط به هر سه Case را در طول چرخه های کاری مختلف نشان می دهد. همانطور که انتظار می رود، در Case 1، یعنی بدون اجرای اقدامات تعمیر و نگهداری، مقادیر عدم دسترس پذیری HPIS بطور پیوسته در طول چرخه های کاری در حال افزایش می باشد. براساس شکل (a) - (a) مشخص می شود که مقادیر عدم دسترس پذیری HPIS برای Case 1 و Case 3 در انتهای اولین چرخه کاری برابر است، در حالی که Case 2 مقدار کوچکتری را نشان می دهد. این نتیجه تأیید می کند که Case 2 به دلیل نادیده گرفتن سهم تخریب تدریجی ناشی از تست در نرخ خرابی وضعیت آماده باش مربوط به تجهیزات MDP و MOV ناقص است. در شکل (a) - (b) قابل مشاهده است که ارزیابی عدم دسترسی پذیری پیش‌بینی شده توسط Case 3 در طول تمامی چرخه های کاری بزرگتر از Case 2 می باشد و این تفاوت در طول زمان افزایش می یابد، شکل (b) - (b) به عنوان مثال، با مقایسه مقدار عدم دسترس پذیری پیش‌بینی شده توسط Case 2 و Case 3، مشاهده می شود که در پایان چرخه کاری پنجم یک افزایش ۰،۱۷٪ حاصل می شود. همچنین، رفتار مجانبی عدم دسترس پذیری Case 3 به دلیل تجمع اثرات تخریب تدریجی ناشی از تست و فرسودگی مربوط به اجزای HPIS دیرتر از Case 2 اتفاق می افتد. شکل ۵ نشان می دهد که افزایش عدم دسترس پذیری HPIS در چرخه های اولیه قابل توجه تر است و با اجرای یک برنامه تعمیر و نگهداری مناسب قابل کنترل می باشد.



Case هر سه (a)



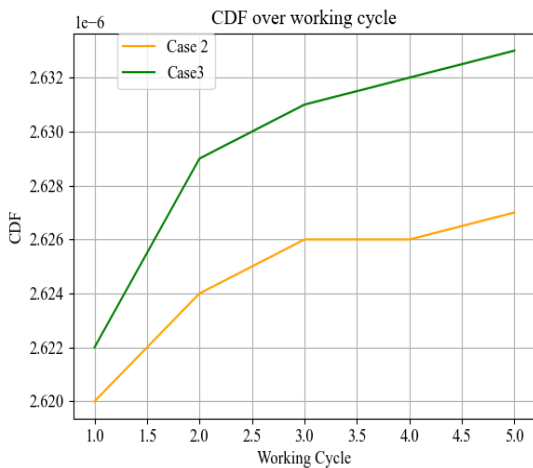
(a) MDP



(b) MOV

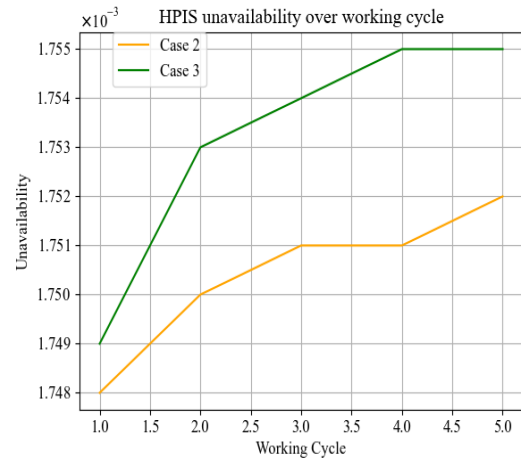
شکل ۴: متوسط عدم دسترس پذیری در طول دو اقدام نگهداری متوالی

به منظور بررسی تاثیر پذیری عدم دسترس پذیری HPIS و معیار ریسک CDF به عنوان تابعی از عمر نیروگاه که به صراحت به اجرای اقدامات تست و نگهداری وابسته می باشند، مدل های عدم دسترس پذیری تجهیز، یعنی Cases 1, 2, 3، در مدل PSA استاندارد سطح ۱



(b) Case 2 &amp; Case 3

شکل ۶: رفتار CDF طول چرخه های کاری



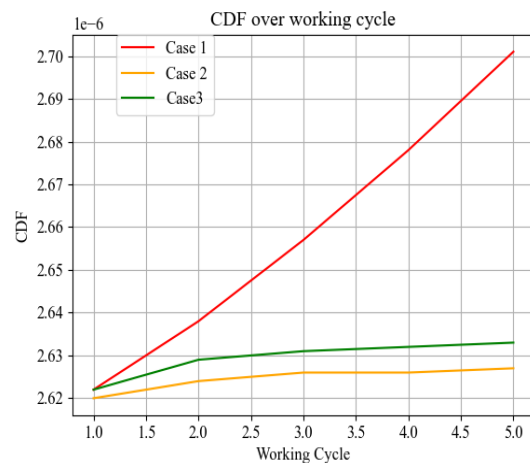
(b) Case 2 &amp; Case 3

شکل ۵: متوسط عدم دسترس پذیری HPIS در طول چرخه های کاری

### نتیجه گیری

این موضوع که معیار ریسک CDF به دلیل اثرات تجمعی فرسودگی و تخریب تدریجی تجهیزات در NPP افزایش می یابد، امری پذیرفته شده است. یکی از روش های کارآمد برای ارزیابی معیار ریسک CDF وابسته به عمر، به عنوان تابعی از پارامترهای نشان دهنده فرسودگی، فرکانس اجرای اقدامات تست و نگهداری و اثرات مرتبط با آنها، جایگزینی مدل عدم دسترس پذیری تجهیز وابسته به عمر در مدل های PSA استاندارد سطح ۱ می باشد. در این پژوهش یک رویکرد جدید برای مدل سازی عدم دسترس پذیری تجهیزات حیاتی مرتبط با یک سیستم ایمنی نوعی در نیروگاه هسته ای ارائه شده است. این مدل امکان ارزیابی متوسط عدم دسترس پذیری یک تجهیز در وضعیت آماده باش را به گونه ای فراهم می کند، که به طور همزمان و صریح تمامی عوامل تاثیر گذار بر نرخ خرابی تجهیز، شامل اثرات فرسودگی، تخریب تدریجی ناشی از تست، و اثربخشی تعمیر و نگهداری، را در خود جای داده است. این مدل برای ارزیابی عدم دسترس پذیری اجزای حیاتی زیر سیستم HPIS به عنوان بخشی از ECCS نیروگاه هسته ای-VVER 1000/V446 بکار گرفته شده و با سایر مدل های موجود مقایسه شده است. نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی با بررسی اثرات قابل توجه، مقادیر واقعی تری از عدم دسترس پذیری در سطح تجهیز را نسبت به مدل های دیگر بدست می دهد. به منظور به روز رسانی معیارهای عدم دسترس پذیری در سطح سیستم و ریسک در سطح نیروگاه، هر سه مدل عدم دسترس پذیر تجهیز در مدل PSA استاندارد نیروگاه بکار گرفته شدند. نتایج به دست آمده از مدل های مختلف نشان می دهد که عدم دسترس پذیری سیستم و معیار ریسک نیروگاه، یعنی CDF، توابع صریحی از فرسودگی، تخریب تدریجی ناشی از تست و اثربخشی نگهداری مربوط به اجزای حیاتی می باشند. بنابراین، مدل جامع

شکل (a)-6 مقادیر CDF حاصل از رویداد آغازگر SGTR را برای پنج چرخه کاری نشان می دهد. با توجه به شکل واضح است که اقدامات تعمیر و نگهداری به کاهش قابل توجه مقادیر CDF کمک می کند، و در Case 1، یعنی بدون اجرای اقدامات تعمیر و نگهداری، افزایش قابل توجه CDF مشاهده می گردد. بنابراین عدم وجود اقدامات تعمیر و نگهداری ممکن است به طور قابل ملاحظه ای بر معیار ریسک CDF تأثیر بگذارد. در شکل (a)-6 قابل مشاهده است که Case 1 و Case 3 در پایان اولین چرخه کاری دارای مقادیر CDF یکسان و در مقایسه با Case 2 دارای مقادیر بزرگتری می باشند. شکل (b)-6 نشان می دهد که CDF در طول زمان رشد افزایشی دارد و در Case 3 به دلیل در نظر گرفتن اثرات تخریب تدریجی ناشی از تست، رفتار مجانبی نسبت به Case 2 دیرتر حاصل می گردد. به عنوان مثال، مقایسه CDF های حاصل از این دو Case در پایان پنجمین چرخه کاری، یک افزایش ۰.۲۲٪ برای Case 3 نسبت به Case 2 را نتیجه می دهد، که تاثیر سهم تست ها در رشد CDF را تأیید می کند.



(a) هر سه Case

- failure distributions and three inspection/maintenance policies. *Reliability Engineering & System Safety*, 1993. **39**(1): p. 35-54.
- [7] Hilsmeier, T.A., T. Aldemir, and W.E. Vesely, Time-dependent unavailability of aging standby components based on nuclear plant data. *Reliability Engineering & System Safety*, 1995. **47**(3): p. 199-205.
- [8] Apostolakis, G. and T. Chu, The unavailability of systems under periodic test and maintenance. *Nuclear Technology*, 1980. **50**(1): p. 5-15.
- [9] Cepin, M., Optimization of safety equipment outages improves safety. *Reliability Engineering & System Safety*, 2002. **77**(1): p. 71-80.
- [10] Čepin, M. and B. Mavko, Probabilistic safety assessment improves surveillance requirements in technical specifications. *Reliability Engineering & System Safety*, 1997. **56**(1): p. 69-77.
- [11] Vaurio, J., Unavailability of components with inspection and repair. *Nuclear Engineering and Design*, 1979. **54**(3): p. 309-324.
- [12] Vaurio, J., Unavailability analysis of periodically tested standby components. *IEEE transactions on reliability*, 1995. **44**(3): p. 512-517.
- [13] Kančev, D. and M. Čepin, 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*, 2011. **24**(2): p. 146-155.
- [14] Martón, I., et al., Optimization of test and maintenance of ageing components consisting of multiple items and addressing effectiveness. *Reliability Engineering & System Safety*, 2016. **153**: p. 151-158.
- [15] Martorell, S., A. Sanchez, and V. Serradell, Age-dependent reliability model considering effects of maintenance and working conditions. *Reliability Engineering & System Safety*, 1999. **6**:(1) p. 19-31.
- [16] Shin, S.M., I.S. Jeon, and H.G. Kang, Surveillance test and monitoring strategy for the availability improvement of standby equipment using age-dependent model. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015. **135**: p. 100-106.
- [17] Kančev, D., et al., Time-dependent unavailability of equipment in an ageing NPP: sensitivity study of a developed model. *Reliability Engineering & System Safety*, 2016. **148**: p. 11-20.
- [18] Modarres, M., M.P. Kaminskiy, and V. Krivtsov, *Reliability engineering and risk analysis: a practical guide*. 2009: CRC press.
- [19] Martorell, P., et al., Unavailability model for demand-caused failures of safety components addressing degradation by demand-induced stress, maintenance effectiveness and test efficiency. *Reliability Engineering & System Safety*, 2017. **168**: p. 18-27.
- [20] Vesely, W., Approaches for age-dependent probabilistic safety assessments with emphasis on prioritization and sensitivity studies. 1992, Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (United States). Div.
- [21] Nascimento, J.L., et al., Component unavailability model for PSA Level I applications considering aging and startup degradation: An Application to an Emergency Diesel Generator System. *Annals of Nuclear Energy*, 2021. **153**: p. 108000.
- [22] Martorell, S., et al., Harmonisation of surveillance requirements and maintenance in a context of ageing and obsolescence based on reliability, availability and risk

پیشنهادی به دلیل در بر داشتن این اثرات، نتایج واقعی تری را ارائه می دهد و می تواند در برنامه ریزی و کنترل کارآمد برنامه های تست و نگهداری استفاده شود. در انتها، توجه شود که در این مقاله، تنها اجزای حیاتی یک زیرسیستم در Ageing- PSA در نظر گرفته شده است. برای ارزیابی اثرات کلی فرسودگی، تخریب تدریجی ناشی از تست و اقدامات نگهداری بر معیارهای تصمیم گیری در نیروگاه، در پژوهش های آینده باید از داده های مختص نیروگاه، از جمله فرسودگی، تخریب تدریجی ناشی از تست و اثربخشی نگهداری استفاده گردد و تمامی اجزای حیاتی نیز را در نظر گرفته شود.

### فهرست علائم

NPP	نیروگاه هسته ای
MOV	شیر موتوری
MDP	پمپ موتوری
HPIS	سیستم تزریق خنک کننده با فشار بالا
CDF	فرکانس آسیب به قلب
ECCS	سیستم اضطراری خنک کننده قلب
PSA	ارزیابی ایمنی احتمالاتی
TS	مشخصات فنی
FT	درخت خطا
ET	درخت رویداد
SGTR	ترکیدگی تیوب های مولد بخار
PM	نگهداری پیشگیرانه
$\epsilon_D$	اثر بخشی اقدامات نگهداری برای خرابی های به ازای تقاضا
$\epsilon_S$	اثر بخشی اقدامات نگهداری برای خرابی های در وضعیت آماده باش

### مراجع

- [1] Kančev, D., M. Čepin, and B. Gjorgiev, Development and application of a living probabilistic safety assessment tool: Multi-objective multi-dimensional optimization of surveillance requirements in NPPs considering their ageing. *Reliability Engineering & System Safety*, 2014. **131**: p. 135-147.
- [2] Kim, I., et al., Risk analysis of surveillance requirements including their adverse effects. *Reliability Engineering & System Safety*, 1994. **45**(3): p. 225-234.
- [3] Kim, I., et al., Quantitative evaluation of surveillance test intervals including test-caused risks. 1992, Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (United States). Div.
- [4] Martón, I., A.I. Sánchez, and S. Martorell, Ageing PSA incorporating effectiveness of maintenance and testing. *Reliability Engineering & System Safety*, 2015. **139**: p. 131-140.
- [5] Samanta, P.K., et al., Handbook of methods for risk-based analyses of technical specifications. 1994, Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (United States). Div.
- [6] Dialynas, E. and D. Michos, Time-dependent unavailability analysis of standby components incorporating arbitrary

- [25] Martorell, S., et al., Parameter estimation of a reliability model of demand-caused and standby-related failures of safety components exposed to degradation by demand stress and ageing that undergo imperfect maintenance. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017. **2017**.
- [26] Martorell, S., et al., Simultaneous and multi-criteria optimization of TS requirements and maintenance at NPPs. *Annals of Nuclear Energy*, 2002. **29**(2): p. 147-168.
- information. *Reliability Engineering & System Safety*, 2020. **202**: p. 106992.
- [23] AEOL (A.E.O.o.I.), PSA of Bushehr Nuclear Power Reactor. Probabilistic Safety Assessment Level 1, App. G. 2003.
- [24] Levy, I., et al., Prioritization of TIRGALEX (Technical Integration Review Group for Aging and Life Extension): Recommended components for further aging research. 1988, Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC (USA). Div. of Engineering