





دانشگاه صنعتی شاهرود

پایان نامه کارشناسی ارشد

گروه مهندسی برق - قدرت

# تأثیر خطای انسانی بر روی زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی

نگارنده:

آرمین میرصمدی

اساتید راهنما:

دکتر محسن اصیلی

دکتر یاسر دامچی

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم که برای رشد و بالندگی من از جان و دل مایه گذاشتند.

سپاسگزاری از

اساتید گرامی، دکتر محسن اصیلی و دکتر یاسر دامچی که بارها راهنمایی‌های خود، دین شرفت این پایان نامه من را  
همراهی کردند.

# تعهد نامه

اینجانب آرمین میرصمدی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق-قدرت (گرایش سیستم‌های قدرت) دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تأثیر خطای انسانی بر روی زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی تحت راهنمایی دکتر محسن اصیلی و دکتر یاسر دامچی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
  - در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
  - مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
  - کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
  - حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
  - در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

## تاریخ

## امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده:

امروزه با رشد و توسعه شبکه قدرت، تداوم سرویس‌دهی به مشترکین و کاهش خاموشی‌های شبکه اهمیت بالایی پیدا می‌کند و از اهداف مهندسين شبکه قدرت می‌باشد. حفظ قابلیت اطمینان سیستم قدرت در سطح مطلوب، از جمله راهکارهایی است که می‌تواند این اهداف را برآورده کند. یکی از راهکارها برای افزایش قابلیت اطمینان شبکه، استفاده از سیستم حفاظتی با عملکرد مطلوب است. به منظور داشتن سیستم حفاظتی با عملکرد مطلوب، این سیستم باید در بازه‌های زمانی معینی تحت تست دوره‌ای قرار بگیرد، زیرا این تست عملکرد اشتباه یا عملکرد نایجای رله در اثر خرابی‌هایی که در رله بوجود می‌آید را کاهش می‌دهد. نرخ خرابی رله‌ها یکی از عوامل مؤثر در تعیین بازه‌های زمانی این تست است. از طرفی، خطای انسانی یکی از عواملی است که می‌تواند نقش بسزایی در افزایش نرخ خرابی رله‌ها داشته باشد.

با توجه به توضیحات فوق، در این پایان‌نامه به بررسی تأثیر خطای انسانی بر روی زمان بهینه تست دوره‌ای و قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی با استفاده از مدل مارکوف پرداخته می‌شود. برای نیل به این هدف، یک مدل مارکوف ۵ حالت برای سیستم حفاظتی خط انتقال و یک مدل مارکوف ۱۷ حالت برای سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت پیشنهاد می‌شود. این نکته قابل ذکر است که دیدگاه پیشنهادی برای مدلسازی تأثیر خطای انسانی بر روی سیستم حفاظتی، برای هر سیستم حفاظتی دیگر قابل پیاده‌سازی است. با توجه به نتایج شبیه‌سازی، خطای انسانی تأثیر قابل ملاحظه در افزایش نرخ خرابی و در نتیجه، کاهش متوسط فاصله زمانی تا خرابی و زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی دارد.

**کلمات کلیدی:** خطای انسانی، نرخ شکست سیستم حفاظتی، قابلیت اطمینان، مدل مارکوف، بازه

زمانی بهینه تست دوره‌ای

## فهرست مطالب

۱	فصل اول (پیشگفتار).....
۲	۱-۱   مقدمه.....
۳	۲-۱   اهداف پژوهش.....
۳	۳-۱   ساختار پایان نامه.....
۵	فصل دوم (مبانی نظری).....
۶	۱-۲   مقدمه.....
۶	۲-۲   قابلیت اطمینان.....
۸	۱-۲-۲   روش های بهبود قابلیت اطمینان.....
۹	۲-۲-۲   ارزیابی قابلیت اطمینان.....
۱۶	۳-۲   روش های تعمیر و نگهداری.....
۱۷	۱-۳-۲   تعمیر و نگهداری بر پایه زمان.....
۱۷	۲-۳-۲   تعمیر و نگهداری بر پایه کارایی.....
۱۷	۳-۳-۲   تعمیر و نگهداری بر پایه شرایط.....
۱۸	۴-۳-۲   تعمیر و نگهداری قابلیت اطمینان محور.....
۱۸	۴-۲   سیستم حفاظتی.....
۱۹	۱-۴-۲   قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی.....
۲۰	۲-۴-۲   تست های سیستم های حفاظتی.....
۲۰	۱-۲-۴-۲   انواع تست های کاربردی برای سیستم حفاظتی.....
۲۱	۲-۲-۴-۲   فعالیت انجام شده برای تعمیرات و نگهداری سیستم حفاظتی.....
۲۳	۵-۲   راهکارهای افزایش قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی.....
۲۳	۱-۵-۲   تست دوره ای.....
۲۳	۲-۵-۲   تست مانیتورینگ.....
۲۴	۳-۵-۲   تست خودبازبینی.....
۲۵	۶-۲   خطای انسانی.....
۲۵	۱-۶-۲   تعریف خطای انسانی.....
۲۷	۲-۶-۲   طبقه بندی خطای انسانی.....
۲۷	۱-۲-۶-۲   خطا و لغزش.....
۲۹	۲-۲-۶-۲   اشتباهات.....
۲۹	۳-۲-۶-۲   تخلف.....
۳۰	۳-۶-۲   آنالیز قابلیت اطمینان انسانی.....
۳۱	۷-۲   جمع بندی.....
۳۳	فصل سوم (تاریخچه موضوع و مروری بر پژوهش های انجام شده).....
۳۴	۱-۳   مقدمه.....
۳۴	۲-۳   بررسی مطالعات انجام شده در زمینه خطای انسانی.....
۳۸	۳-۳   بررسی مطالعات انجام شده در زمینه تست دوره ای سیستم حفاظتی.....

۴-۳	خلاصه پژوهش‌های انجام شده.....	۴۴
۵-۳	جمع‌بندی.....	۴۶
<b>فصل چهارم ( مدل‌سازی تأثیر خطای انسانی بر روی نرخ خرابی سیستم حفاظتی ) ..... ۴۹</b>		
۱-۴	مقدمه.....	۵۰
۲-۴	تأثیر خطای انسانی بر روی زمان بهینه تست دوره‌ای.....	۵۰
۱-۲-۴	مدل تجمیع شده سیستم حفاظتی.....	۵۰
۲-۲-۴	مدل مارکوف گسترده سیستم حفاظتی و عنصر تحت حفاظت.....	۵۲
۳-۴	مدل مارکوف پیشنهادی برای تعیین نرخ خرابی سیستم حفاظتی خط انتقال.....	۵۴
۱-۳-۴	نتایج عددی تأثیر خطای انسانی بر شاخص‌های قابلیت اطمینان و زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی خط انتقال.....	۵۷
۱-۱-۳-۴	تأثیر نرخ خطای انسانی بر نرخ خرابی سیستم حفاظتی خط انتقال.....	۵۸
۲-۱-۳-۴	تعیین زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی خط انتقال بدون در نظر گرفتن تست خودبازبینی.....	۵۹
۳-۱-۳-۴	تعیین زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی خط انتقال با در نظر گرفتن تست خودبازبینی.....	۶۴
۴-۴	مدل مارکوف پیشنهادی برای تعیین نرخ خرابی سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت.....	۷۰
۱-۴-۴	نتایج عددی تأثیر خطای انسانی بر روی شاخص‌های قابلیت اطمینان و زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت.....	۷۵
۱-۱-۴-۴	تأثیر نرخ خطای انسانی بر نرخ خرابی سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت.....	۷۵
۲-۱-۴-۴	تعیین زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت بدون در نظر گرفتن تست خودبازبینی.....	۷۷
۳-۱-۴-۴	تعیین زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت با در نظر گرفتن تست خودبازبینی.....	۸۱
<b>فصل پنجم (جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادات) ..... ۸۹</b>		
۱-۵	جمع‌بندی.....	۹۰
۲-۵	نتیجه‌گیری.....	۹۰
۳-۵	پیشنهادات.....	۹۲
۹۳	مراجع:	



## فهرست شکل‌ها

۱۳	-----	نمودار حالت مکان یک سیستم دارای یک تجهیز تعمیرپذیر	شکل (۱-۲)
۱۵	-----	نمودار حالت مکان برای یک سیستم دارای دو تجهیز تعمیرپذیر	شکل (۲-۲)
۱۵	-----	نمودار حالت مکان برای دو تجهیز یکسان تعمیرپذیر	شکل (۳-۲)
۲۴	-----	نمودار نحوه عملکرد تست مانیتورینگ	شکل (۴-۲)
۲۴	-----	نمودار نحوه عملکرد تست خودبازبینی	شکل (۵-۲)
۵۱	-----	مدل مارکوف قابلیت اطمینان تجمیع شده	شکل (۱-۴)
۵۴	-----	مدل مارکوف گستره شده سیستم حفاظتی و عنصر تحت حفاظت	شکل (۲-۴)
۵۷	-----	مدل مارکوف برای تعیین نرخ خرابی سیستم حفاظتی خط انتقال با در نظر گرفتن خطای انسانی	شکل (۳-۴)
۶۰	-----	شاخص دسترس‌پذیری مدل قابلیت اطمینان بدون در نظر گرفتن تست خودبازبینی برای سیستم حفاظتی خط انتقال	شکل (۴-۴) الف
۶۱	-----	شاخص قابلیت اتکا مدل قابلیت اطمینان بدون در نظر گرفتن تست خودبازبینی برای سیستم حفاظتی خط انتقال	شکل (۴-۴) ب
۶۱	-----	شاخص دسترس‌ناپذیری مدل قابلیت اطمینان بدون در نظر گرفتن تست خودبازبینی برای سیستم حفاظتی خط انتقال	شکل (۴-۴) ج
۶۲	-----	شاخص دسترس‌ناپذیری غیرعادی مدل قابلیت اطمینان بدون در نظر گرفتن تست خودبازبینی برای سیستم حفاظتی خط انتقال	شکل (۴-۴) د
۶۲	-----	شاخص امنیت مدل قابلیت اطمینان بدون در نظر گرفتن تست خودبازبینی برای سیستم حفاظتی خط انتقال	شکل (۴-۴) ه
۶۵	-----	شاخص دسترس‌پذیری مدل قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن تست خودبازبینی برای سیستم حفاظتی خط انتقال	شکل (۵-۴) الف
۶۶	-----	شاخص قابلیت اتکا مدل قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن تست خودبازبینی برای سیستم حفاظتی خط انتقال	شکل (۵-۴) ب
۶۶	-----	شاخص دسترس‌ناپذیری مدل قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن تست خودبازبینی برای سیستم حفاظتی خط انتقال	شکل (۵-۴) ج
۶۷	-----	شاخص دسترس‌ناپذیری غیرعادی مدل قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن تست خودبازبینی برای سیستم حفاظتی خط انتقال	شکل (۵-۴) د
۶۷	-----	شاخص امنیت مدل قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن تست خودبازبینی برای سیستم حفاظتی خط انتقال	شکل (۵-۴) ه
۷۲	-----	مدل مارکوف پیشنهادی برای تعیین نرخ خرابی سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت با در نظر گرفتن خطای انسانی	شکل (۶-۴)
۷۹	-----	شاخص دسترس‌پذیری مدل قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت بدون در نظر گرفتن تست خودبازبینی	شکل (۷-۴) الف
۷۹	-----	شاخص قابلیت اتکا مدل قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت بدون در نظر گرفتن تست خودبازبینی	شکل (۷-۴) ب

۸۰	-----	شاخص دسترس‌ناپذیری مدل قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت بدون در نظر گرفتن تست خودبازبینی	شکل (۷-۴) ج
۸۰	-----	شاخص دسترس‌ناپذیری غیرعادی مدل قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت بدون در نظر گرفتن تست خودبازبینی	شکل (۷-۴) د
۸۱	-----	شاخص امنیت مدل قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت بدون در نظر گرفتن تست خودبازبینی	شکل (۷-۴) ه
۸۳	-----	شاخص دسترس‌پذیری مدل قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت با در نظر گرفتن تست خودبازبینی	شکل (۸-۴) الف
۸۴	-----	شاخص قابلیت اتکا مدل قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت با در نظر گرفتن تست خودبازبینی	شکل (۸-۴) ب
۸۴	-----	شاخص دسترس‌ناپذیری مدل قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت با در نظر گرفتن تست خودبازبینی	شکل (۸-۴) ج
۸۵	-----	شاخص دسترس‌ناپذیری غیرعادی مدل قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت با در نظر گرفتن تست خودبازبینی	شکل (۸-۴) د
۸۵	-----	شاخص امنیت مدل قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت با در نظر گرفتن تست خودبازبینی	شکل (۸-۴) ه

## فهرست جدول‌ها

۴۴	-----	پژوهش‌های انجام شده در یک نگاه	جدول (۱-۳)
۵۱	-----	حالت‌های مدل مارکوف تجمیع شده	جدول (۱-۴)
۵۸	-----	نرخ‌های به کار برده شده برای مدل مارکوف سیستم حفاظتی و عنصر تحت حفاظت	جدول (۲-۴)
۵۸	-----	نرخ‌های به کار برده شده برای مدل مارکوف سیستم حفاظتی خط انتقال	جدول (۳-۴)
۵۹	-----	تأثیر نرخ خطای انسانی بر روی نرخ خرابی سیستم حفاظتی خط انتقال	جدول (۴-۴)
۶۳	-----	احتمال شاخص‌های قابلیت اطمینان و زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی خط انتقال بدون در نظر گرفتن تست خودبازبینی	جدول (۵-۴)
۶۸	-----	احتمال شاخص‌های قابلیت اطمینان و زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی خط انتقال با در نظر گرفتن تست خودبازبینی	جدول (۶-۴)
۷۵	-----	نرخ‌های به کار برده شده برای مدل‌های مارکوف پیشنهادی	جدول (۷-۴)
۷۶	-----	تأثیر نرخ خطای انسانی بر روی نرخ خرابی سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت	جدول (۸-۴)
۷۸	-----	احتمال شاخص‌های قابلیت اطمینان و زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت بدون در نظر گرفتن تست خودبازبینی	جدول (۹-۴)
۸۶	-----	احتمال شاخص‌های قابلیت اطمینان و زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت با در نظر گرفتن تست خودبازبینی	جدول (۱۰-۴)

## علائم اختصاری

فعال بودن	UP
غیرفعال بودن	DN
ایزوله بودن	ISO
تعمیر	REP
بازرسی	INS
عنصر تحت حفاظت	C
حفاظت اصلی	P
عنصری که به دلیل عملکردن حفاظت پشتیبان از سرویس دهی خارج شده	X
نرخ شکست	$\lambda$
نرخ تعمیر	$\mu$
نرخ کلیدزنی	S
رله اضافه جریان	OC
رله خطای زمین	EF
رله خطای زمین محدود شده	REF
رله دیفرانسیل	DIF
رله دیستانس	DIS
نرخ خرابی رله اضافه جریان	$\lambda_{OC}$
نرخ خرابی رله خطای زمین	$\lambda_{EF}$
نرخ خرابی رله خطای زمین محدود شده	$\lambda_{REF}$
نرخ خرابی رله دیفرانسیل	$\lambda_{DIF}$
نرخ خرابی رله دیستانس	$\lambda_{Dis}$
نرخ خطای انسانی نوع ۱	$\lambda_{H4}$
نرخ خطای انسانی نوع ۲	$\lambda_{H3}$
نرخ خطای انسانی نوع ۳	$\lambda_{H2}$
نرخ خطای انسانی نوع ۴	$\lambda_{H1}$
نرخ تعمیر رله اضافه جریان	$\mu_{OC}$
نرخ تعمیر رله خطای زمین	$\mu_{EF}$
نرخ تعمیر رله خطای زمین محدود شده	$\mu_{REF}$
نرخ تعمیر رله دیفرانسیل	$\mu_{DIF}$
نرخ تعمیر رله دیستانس	$\mu_{Dis}$
نرخ تعمیر از حالت شکست حاصل از خطای انسانی	$\mu_H$
نرخ تعمیر رله‌ها از حالت شکست کامل سیستم حفاظتی	$\mu_{tt}$
نرخ شکست رله	$\lambda_p$
نرخ شکست عنصر تحت حفاظت	$\lambda_c$
نرخ خطای با دلیل بین رله و عنصر تحت حفاظت	$\lambda_{cc}$
نرخ شکست رله که توسط تست خودبازبینی شناسایی نشده	$\lambda_{pp}$

$\lambda_{st}$	نرخ شکست رله که توسط تست خودبازبینی شناسایی شده
$\mu_c$	نرخ تعمیر عنصر تحت حفاظت
$\mu_t$	نرخ بازرسی رله
$\mu_r$	نرخ تعمیر رله
$S_n$	عملکرد قطع معمولی
$S_b$	عملکرد قطع حفاظت پشتیبان
$S_m$	عملکرد جداسازی دستی
$\theta_{pm}$	نرخ بازرسی سیستم حفاظتی
RTTI	بازه زمانی بازرسی حفاظتی (تست دوره‌ای)

فصل اول

پیشگفتار

در این پایان‌نامه واژه‌های خطای انسانی و تست دوره‌ای سیستم حفاظتی، دو واژه کلیدی هستند. خطای انسانی به عنوان شکست در اجرای فعالیت از پیش توصیف شده تعریف می‌شود، که می‌تواند منجر به آسیب رسیدن به تجهیزات و یا اختلال در فعالیت‌های برنامه‌ریزی شده شود. در کنار این تعریف، باید دو نکته زیر برآورده شود [۱]:

۱. شرایط عملیاتی که فعالیت انسانی از پیش تعیین شده برای آن طراحی شده است، مهیا و قابل بازرسی باشد.

۲. انسان برای این که فعالیت از پیش توصیف شده را اجرا کند کاملاً به صورت فیزیکی و ذهنی تحت شرایط قرار گرفته باشد.

تست دوره‌ای سیستم حفاظتی به تستی گفته می‌شود که در فواصل زمانی معین برای شناسایی و رفع خرابی‌های این سیستم، به منظور افزایش قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی و رسیدن به دسترس‌پذیری بالای آن اجرا می‌شود. در رله‌های امروزی که مجهز به تست‌های خودبازبینی و مانیتورینگ می‌باشند، تست دوره‌ای در فواصل زمانی طولانی‌تری نسبت به رله‌های قدیمی اجرا می‌شود، چرا که در این رله‌ها بخش‌هایی از خرابی توسط تست‌های خودبازبینی و مانیتورینگ مشخص می‌شود. زمان تست دوره‌ای برای این که دسترس‌پذیری سیستم حفاظتی بیشینه گردد، باید بهینه شود. خطای انسانی بر روی نرخ خرابی رله‌ها و در نتیجه بر روی زمان بهینه تست مؤثر است و می‌تواند باعث کاهش بازه زمان این تست شود. کاهش زمان تست دوره‌ای ممکن است باعث افزایش حوادث نامطلوبی همچون بروز خطای انسانی شود و همچنین افزایش هزینه تعمیرات و نگهداری را به دنبال خواهد داشت.

عملکرد نامطلوب سیستم حفاظتی می‌تواند سبب بروز حوادث مخربی در شبکه قدرت شود. به عنوان مثال می‌توان به حوادث مربوط به ۲ و ۳ جولای و ۱۰ اگوست سال ۱۹۹۶ در شبکه WSCC<sup>۱</sup> اشاره

---

<sup>1</sup> Western Systems Coordinating Council

نمود [۲]. در حادثه مربوط به ۲ جولای، وقوع خطای زمین و عمل نکردن رله حفاظتی باعث خروج ۲ خط تولید کننده توان، اضافه بار و افت ولتاژ شدید در خطوط و در نتیجه تقسیم ناحیه به ۵ جزیره شد. این اتفاقات در برق رسانی ۲ میلیون مصرف کننده اختلال پیش آورد. در حادثه مربوط به ۳ جولای، همان رله دوباره مشکل ساز شد و دو خط تولید کننده توان از دسترس خارج شد. در حادثه ۱۰ اگوست، رعایت نکردن حداقل شاخص قابلیت اطمینان باعث خروج خط، اضافه بار و باز شدن خطوط موازی و افت ولتاژ خطوط شد که خروج واحدهای تولیدی و تقسیم ناحیه به ۴ جزیره را در پی داشت. از نتایج این اتفاق خروج ۲۸ گیگاوات بار و ۲۰ گیگاوات تولید و اختلال در سرویس رسانی به ۷/۵ میلیون مصرف کننده بود. یکی از عوامل مؤثر در بروز این حادثه عملکرد اشتباه رله بوده است. وقوع چنین حوادثی حاکی از اهمیت بسیار بالای عملکرد مطلوب سیستم حفاظتی است.

## ۲-۱ | اهداف پژوهش

با توجه به توضیحات فوق به منظور داشتن سیستم حفاظتی مطلوب، این سیستم باید در بازه زمانی منظم، تحت تست دوره‌ای قرار بگیرد. نرخ خرابی سیستم حفاظتی یکی از عوامل مؤثر بر روی این بازه است که خطای انسانی یکی از عوامل مؤثر روی آن می‌باشد. بنابراین هدف این پایان‌نامه، مدل‌سازی تأثیر خطای انسانی بر روی نرخ خرابی سیستم حفاظتی و زمان بهینه تست دوره‌ای آن با استفاده از روش مارکوف است. دیدگاه پیشنهادی بر روی سیستم حفاظتی خط و ترانسفورماتور قدرت، اعمال شده است، ولی برای سیستم حفاظتی اجزاء دیگر سیستم قدرت قابل گسترش است.

## ۳-۱ | ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه علاوه بر این فصل، شامل ۴ فصل دیگر نیز می‌باشد. در فصل ۲ مبانی نظری مربوط به قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی و خطای انسانی بررسی شده است. در فصل ۳، به بررسی بر مطالعات انجام شده در زمینه خطای انسانی و تعیین زمان بهینه دوره‌ای سیستم حفاظتی پرداخته شده است. در فصل ۴ مدل مارکوفی برای مدل‌سازی تأثیر خطای انسانی بر روی نرخ خرابی سیستم حفاظتی خط



انتقال و ترانسفورماتور قدرت پیشنهاد داده شده و سپس با توجه به نرخ خرابی بدست آمده برای سیستم حفاظتی، زمان بهینه تست دوره‌ای این سیستم تعیین شده است. در نهایت در فصل ۵ جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهاداتی برای ادامه کار ارائه شده است.

## فصل دوم

### مبانی نظری

## ۲-۱ | مقدمه

در این فصل ابتدا موضوع قابلیت اطمینان و روش‌های ارزیابی آن شرح داده می‌شود، سپس سیستم حفاظتی و اصطلاحاتی که در این سیستم به کار برده می‌شود مورد بررسی قرار می‌گیرد و در نهایت موضوع خطای انسانی و مفاهیم مرتبط با آن بیان می‌شود.

## ۲-۲ | قابلیت اطمینان

سیستم‌های توان الکتریکی، دارای پیچیدگی زیاد می‌باشند. دلیل این پیچیدگی، بسیاری از عوامل همچون موارد زیر است [۳]:

- سائز فیزیکی خاص.
- گسترش وسیع جغرافیایی.
- ارتباطات داخلی ملی و بین‌المللی.
- جریان‌هایی که به راحتی مسیرهای حمل و نقل مورد نظر اپراتورها را دنبال نمی‌کنند، اما به طور طبیعی قوانین فیزیکی را دنبال می‌کنند.
- انرژی الکتریکی نمی‌تواند به صورت مؤثر و کارآمد در مقیاس‌های زیاد ذخیره شوند.
- رفتار غیرقابل پیش‌بینی سیستم در نقطه‌ای از سیستم، که می‌تواند در فاصله‌ای طولانی از منبع مشکل اساسی ایجاد کند.
- و بسیاری از دلایل دیگر.

در جوامع مدرن، مهندسان حرفه‌ای و مدیران فنی، پاسخ‌گوی برنامه‌ریزی، طراحی، ساخت و اجرای محصولات و سیستم‌هایی که در بازه تولیدات ساده و یا سیستم‌های پیچیده قرار دارند، می‌باشند. شکست در موارد گفته شده اغلب می‌تواند باعث ناملایمات و یا تأثیرات سخت بر روی جامعه و محیط زیست شود. این موارد، این ذهنیت را به وجود می‌آوردند که سیستم‌ها چقدر قابل اطمینان می‌باشند. این فکر باعث ایجاد تکنیک‌هایی برای طراحی و اجرای سیستم‌های ساده و پیچیده در کنار هم و افزایش مقدار

نیازمندی‌های قانونی آن شد [۴].

تعریف‌های زیادی برای قابلیت اطمینان آورده شده است. اما تعریفی از آن که به صورت گسترده پذیرفته شده، این چنین است:

"قابلیت اطمینان به احتمال این که یک دستگاه برای اجرای هدفش در دوره‌ای از زمان، و برای شرایط عملیاتی که با آن مواجه شده، به قدر کفایت اجرایی باشد، گفته می‌شود." این تعریف به چهار قسمت پایه تقسیم می‌شود که عبارت است از: احتمالات، کارایی کافی، زمان و شرایط عملیاتی. احتمالات، ورودی عددی را برای ارزیابی قابلیت اطمینان فراهم می‌کند. و همچنین اولین شاخص کفایت سیستم است. سه بخش بعدی پارامترهای مهندسی است و تئوری احتمالات ارزیابی به هیچ کدام از این بخش‌ها کمک نمی‌کند [۴]. این نکته قابل ذکر است که شاخص‌های دیگری نیز برای ارزیابی قابلیت اطمینان وجود دارند که مناسب‌ترین آن وابسته به سیستم و نیازمندی‌های آن است. واژه قابلیت اطمینان برای تمام این شاخص‌ها به کار می‌رود و مختص به شاخص "احتمال" نیست. برخی از شاخص‌های قابلیت اطمینان به شرح زیر هستند [۴]:

- تعداد شکست‌های مورد انتظار، که در بازه زمانی خاصی از زمان مشاهده خواهد شد.
  - میانگین زمان بین شکست‌ها.
  - میزان از دست رفتن عملکرد مورد انتظار در اثر شکست.
  - میزان از دست رفتن خروجی مورد انتظار در اثر شکست.
- ارزیابی قابلیت اطمینان، در ابتدا در ارتباط با صنایع هوایی و کاربردهای نظامی به کار گرفته شد. این گسترش‌ها به سرعت توسط صنایع دیگر دنبال شد. این صنایع عبارت بودند از [۴]:
- صنعت هسته‌ای، که به صورت جدی تحت فشار بسیار زیاد برای اطمینان از امنیت آن و قابلیت اطمینان راکتور هسته‌ای آن بودند.

- تأمین‌کننده‌های الکتریسیته، که انتظار می‌رفت انرژی مورد تقاضا را در کمترین شکست‌های محلی و خروجی‌های در مقیاس بزرگ تأمین کنند.
- نیروگاه‌هایی با روند کارایی پیوسته‌ای همچون نیروگاه فولاد و نیروگاه‌های شیمیایی، که وقوع شکست در آن‌ها موجب بی‌کاری و یا تلفات در مقیاس بزرگ همچون مرگ و میر و آلودگی‌های بزرگ می‌شود.

## ۲-۱ | روش‌های بهبود قابلیت اطمینان

دو روش اصلی برای تاثیرگذاری بر روی قابلیت اطمینان یک سیستم وجود دارد که عبارتند از کیفیت و افزونگی. کیفیت تنها مربوط به مواد فیزیکی و تجهیزات استفاده شده در سیستم نیست بلکه وابسته به کیفیت ساخت، آزمایش کردن، کالیبراسیون، حمل و نقل و عملکرد است. این موارد وابسته به کیفیت و تجربه افراد دست‌اندرکار، فشاری که آن‌ها تحمل می‌کنند، آموزش‌هایی که آن‌ها دیده‌اند و محیط محل کار است. این عامل‌های انسانی نقش بسیار مهمی را در قابلیت اطمینان محصولات و سیستم‌ها بازی می‌کنند. افزونگی اشاره به این مطلب دارد که چون تجهیزات همیشه از زمانی به زمان دیگر شکست می‌خورند، باید پشتیبان موثری برای به عهده‌گیری وظیفه مربوط تجهیز شکست خورده وجود داشته باشد. به این حالت پشتیبان، افزونگی گفته می‌شود. افزونگی خود دو نوع فعال و آماده با کار دارد. نوع فعال زمانی وجود دارد که تجهیزات، عملکرد را میان خودشان مشارکت کنند و اگر یکی (و یا تعداد بیش‌تری) از تجهیزات شکست بخورد، فعالیت به صورت خودکار به وسیله تجهیزات باقیمانده ادامه پیدا می‌کند. به این نوع افزونگی، افزونگی موازی هم گفته می‌شود. افزونگی آماده به کار زمانی وجود دارد که تجهیزات افزونه در حالت آماده به کار قرار گیرند و زمانی به سیستم انتقال یابند که تجهیزات عملیاتی با شکست مواجه شده باشند [۴].

روش دیگر افزایش قابلیت اطمینان گوناگونی است. این بدان معنی است که وقتی افزونگی در سیستم استفاده شده، ممکن است برخی انتخاب‌ها برای تجهیزات مشابهی وجود داشته باشد که از سازندگان

متفاوت هستند. حتی انتخاب در استفاده از محصولات غیر مشابه می‌تواند شامل موارد انتخابی باشد. این موارد با نام گوناگونی مطرح است. منطق روش این است که اگر ضعف ذاتی در یکی از تجهیزات وجود داشته باشد، این ضعف تمام تجهیزات را تحت تاثیر قرار نخواهد داد و سیستم می‌تواند قوی‌تری شود. گوناگونی به این مفهوم است که در همچون مواردی تجهیز ضعیف‌تر تعویض شود و مفهوم آن به معنای تعویض تجهیز قوی‌تر با ضعیف‌تر نیست [۴].

روش‌های دیگری نیز همانند استفاده از قطعات یدکی و تعمیر و نگهداری پیشگیرانه برای بهبود قابلیت اطمینان، وجود دارد. استفاده از قطعات یدکی اشاره به تعویض قطعات شکست خورده به صورت دستی دارد که می‌تواند زمان بیش‌تری بگیرد ولی ساده‌تر باشد. تعمیر و نگهداری پیشگیرانه اشاره به تعویض تجهیز فرسوده شده قبل از شکست آن دارد. این اقدام نیازمند زمان‌بندی و برنامه‌ریزی پیچیده برای تعمیر و نگهداری از سیستم در بازه‌های زمانی، به منظور چک کردن و یا جایگزینی تجهیزات فرسوده است [۴].

## ۲-۲-۲ | ارزیابی قابلیت اطمینان

سیستم‌های قدرت امروزی با شاخص‌های قطعی گذشته قابل ارزیابی نیستند، زیرا این سیستم‌ها ماهیت تصادفی دارند و پیچیده هستند. حل کردن مسائلی که دارای پیچیدگی هستند، باید خوب مهندسی شوند و اقتصادی هم باشند، نیازمند استفاده از روش‌های احتمالاتی هستند. سودمندی‌های ممکن برای سیستم قدرت که از اتصال دو و یا بیش‌تر واحدهای الکتریسیته تشکیل شده، زمانی به صورت منطقی‌ترین حالت ممکن بدست می‌آید که به وسیله روش‌های احتمالاتی ارزیابی شده باشند [۳]. اگر خطر به عنوان عاملی تعریف شود که باعث وقوع اتفاقات خطرناک شده و دارای ماهیت احتمالی است، تکنیک‌های ارزیابی قابلیت اطمینان می‌تواند به هدف ارزیابی احتمالات خطرها کمک کند. تکنیک‌های ارزیابی قابلیت اطمینان هم اکنون گسترده شده‌اند و برای هر شاخه‌ای از مهندسی، تکنیک‌هایی برای ارزیابی در نظر گرفته می‌شود. روشی که بتواند برای ارزیابی چند شاخه از رشته‌های

مهندسی مورد استفاده قرار گیرد وجود ندارد [۴].

اولین نکته مهم در ارزیابی قابلیت اطمینان، فهم کامل از تأثیرات مهندسی سیستم است و تئوری احتمالات نمی‌تواند جای این عملکرد مهندسی سیستم را پوشش دهد. تئوری احتمالات تنها ابزاری است که مهندس را برای انتقال دانش سیستم به پیش‌بینی رفتار محتمل آن در آینده، قادر می‌سازد. بعد از فهم این موضوع، می‌توان مدل و تکنیک ارزیابی مناسب را انتخاب کرد. دو روش تکنیکی اصلی برای ارزیابی قابلیت اطمینان وجود دارد که عبارتند از روش‌های شبیه‌سازی و آنالیزی [۴].

تکنیک‌های آنالیزی سیستم را به وسیله مدل ریاضی نشان می‌دهد و شاخص‌های قابلیت اطمینان این مدل را با استفاده راه‌حل‌های ریاضی ارزیابی می‌کند. روش‌های شبیه‌سازی مونت کارلو شاخص‌های قابلیت اطمینان را به وسیله شبیه‌سازی روند واقعی و رفتار تصادفی سیستم تخمین می‌زند. شبیه‌سازی مونت کارلو نیازمند مقدار زمان طولانی برای محاسبه کردن است و اگر روش‌های تحلیلی جایگزین دیگری برای آن وجود داشته باشد، از آن به صورت گسترده استفاده نمی‌شود [۴]. در این پایان‌نامه فرآیند مارکوف برای مدل کردن تأثیر خطای انسانی بر روی نرخ خرابی سیستم حفاظتی و زمان بهینه تست دوره‌ای آن استفاده می‌شود.

رویکرد مارکوف می‌تواند برای بررسی رفتار تصادفی سیستم‌هایی که زمان و مکان در آن‌ها به صورت گسسته و یا پیوسته تغییر می‌کند، به کار برده شود. تمام روندهای تصادفی با رویکردهای ساده مارکوف قابل مدل شدن نیستند.

برای این‌که رویکرد پایه مارکوف قابل استفاده باشد، رفتار سیستم باید طوری باشد که فاقد حافظه باشد. به این معنا که در مدل مارکوف، حالت بعدی سیستم به تمام حالت‌های قبلی به غیر از حالت آنی قبلی بستگی نداشته باشد. بنابراین رفتار تصادفی آینده سیستم تنها به که این سیستم در حال حاضر کجا قرار دارد، وابسته است و به این‌که در گذشته در کجا قرار داشته و چگونه به حالت فعلی رسیده، بستگی ندارد. مدل مارکوف برای دو حالت پیوسته و گسسته از زمان و مکان قابل بررسی است. در حالت عمومی زمان و مکان هر دو یا پیوسته است و یا هر دو گسسته. در حالت خاص، مکان ممکن است تنها

حالت گسسته داشته باشد اما زمان حالت پیوسته و گسسته دارد. در حالت گسسته، اصطلاح زنجیره مارکوف و در حالت پیوسته اصطلاح فرآیند مارکوف به کار می‌رود [۴].

مسائل قابلیت اطمینان به صورت عادی با سیستم‌هایی در ارتباط است که در مکان گسسته هستند. یعنی آن‌ها می‌تواند در یکی از تعداد حالت‌های شناسایی شده و گسسته در مکان، به صورت گسسته و یا پیوسته در زمان حضور داشته باشند. به هنگامی که سیستم مورد بررسی در مکان گسسته و در زمان پیوسته است، آن‌ها تا زمانی که گذرایی مشاهده شود، می‌توانند به صورت پیوسته در یکی از حالت‌های سیستم، وجود داشته باشند. حالت گذرایی می‌تواند آن‌ها را به صورت گسسته به حالت دیگر منتقل کنند. یعنی جایی که تا گذرایی مشاهده شده بعدی، به صورت پیوسته حضور داشته باشند [۴]. برای بررسی فرآیند مارکوف یک سیستم باید مراحل زیر تعیین شود:

۱. اطلاع از تمام حالت‌ها که می‌توانند موقعیتی را به خود اختصاص دهند.
  ۲. اطلاع از گذرایی‌های ممکن میان حالت‌ها و اختصاص ارزش‌های عددی این گذرایی‌ها.
  ۳. ساختن دسته معادلات دیفرانسیل مناسب و یا ماتریس احتمالات گذرایی تصادفی.
  ۴. در صورت نیاز، استفاده از روش دیفرانسیل برای ارزیابی احتمالات حالت وابسته به زمان.
  ۵. در صورت نیاز، استفاده از روش  $\alpha p = p$  برای ارزیابی حالت حدی احتمالات.
  ۶. اطلاع از حالت‌های فعال، غیرفعال و نیمه‌فعال سیستم مورد مطالعه.
  ۷. ترکیب احتمالات حالت فعال ارزیابی شده در قسمت سوم و/یا چهارم برای بدست آوردن احتمال سیستم در حالت‌های فعال غیرفعال و نیمه‌فعال.
  ۸. استفاده از اصول حالت‌های جاذب<sup>۱</sup> برای حل معادلات دیفرانسیل به روز شده، برای بدست آوردن معادلات قابلیت اطمینان سیستم و استفاده از این معادلات برای رسیدن به MTTF.
- به عنوان مثال برای بررسی روند ارزیابی، یک سیستم تعمیرپذیر که در شکل (۲-۱) نشان داده شده، در نظر گرفته می‌شود. می‌توان روند تحلیلی موارد گفته شده را این چنین بیان کرد. حالت ۱ در سیستم

---

<sup>1</sup> Absorbing State



فوق بیان گر دسترس پذیری سیستم است. این حالت شروع سیستم مورد نظر است. حالت ۲ حالت غیرفعال سیستم است که سیستم در آن با شکست مواجه شده است. سیستم از حالت ۱ با نرخ خرابی  $\lambda$  به حالت ۲ وارد می شود و از حالت ۲ با نرخ تعمیر  $\mu$  به حالت ۱ باز می گردد. هر کدام از این حالتها دارای احتمال هستند. به طور مثال احتمال حالت ۱ با عنوان احتمال دسترس پذیری یا فعال بودن سیستم در نظر گرفته می شود. اگر مقدار حدی احتمالات برای حالت های فوق مورد نظر باشد، می توان از روش های مختلفی استفاده کرد. یک روش ساده استفاده از رابطه (۱-۲) است. برای استفاده از رابطه فوق، باید ماتریس گذرایی را مطابق رابطه (۲-۲) بدست آورد. توجه شود که چون فرآیند مارکوف (در فرآیند مارکوف، زمان، پیوسته در نظر گرفته می شود) برای سیستم در نظر گرفته شده، نرخ های خرابی و تعمیر برای بازه زمانی بسیار کوتاه در نظر گرفته شده و  $\Delta t$  در نرخ های فوق ضرب می شود. با گسترش دادن رابطه (۳-۲)، روابط (۴-۲) و (۵-۲) بدست آورده می شود.  $\Delta t$  از رابطه فوق قابل حذف شدن است و  $P_0$  و  $P_1$  را نیز می توان طبق روابط (۶-۲) و (۷-۲) محاسبه کرد. طبق روابط حاصل شده، می توان ماتریس رابطه (۸-۲) را مشابه ماتریس گذرایی در نظر گرفت و در رابطه (۱-۲) قرار داد. البته توجه شود که این ماتریس، ماتریس گذرایی نیست، چون  $\Delta t$  برای آن در نظر گرفته نشده است.

$$ap = a \quad (1-2)$$

$$\begin{bmatrix} 1 - \lambda \times \Delta t & \lambda \times \Delta t \\ \mu \times \Delta t & 1 - \mu \times \Delta t \end{bmatrix} \quad (2-2)$$

$$[P_0 \quad P_1] \times \begin{bmatrix} 1 - \lambda \times \Delta t & \lambda \times \Delta t \\ \mu \times \Delta t & 1 - \mu \times \Delta t \end{bmatrix} = [P_0 \quad P_1] \quad (3-2)$$

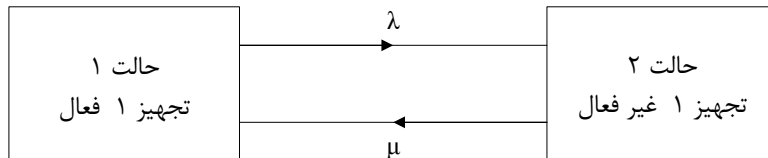
$$-\lambda \times \Delta t \times P_0 + \mu \times \Delta t \times P_1 = 0 \quad (4-2)$$

$$\lambda \times \Delta t \times P_0 - \mu \times \Delta t \times P_1 = 0 \quad (5-2)$$

$$P_0 = \frac{\mu}{\mu + \lambda} \quad (6-2)$$

$$P_1 = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \quad (7-2)$$

$$P = \begin{bmatrix} 1-\lambda & \lambda \\ \mu & 1-\mu \end{bmatrix} \quad (8-2)$$



شکل (۱-۲) نمودار حالت مکان یک سیستم دارای یک تجهیز تعمیرپذیر [۴]

مقادیر وابسته به زمان احتمالات حالت‌های فرآیند مارکوف مطابق روابط (۹-۲) تا (۱۴-۲) بدست می‌آید. اگر بازه زمانی برای فرآیند مارکوف  $dt$  باشد، احتمال عملیاتی بودن سیستم فوق (حالت ۱) در زمان بعد این حالت برابر است با:

"احتمال عملیاتی بودن در زمان  $t$  و با شکست مواجه نشدن در زمان  $dt$  بعلاوه احتمال این که سیستم در زمان  $t$  با شکست مواجه شده باشد و در زمان  $dt$  تعمیر شده باشد."

مقدار احتمال فوق مطابق رابطه (۹-۲) بدست می‌آید. رابطه (۱۰-۲) احتمال شکست سیستم فوق (حالت ۲) در زمان بعد بازه زمانی  $dt$  نشان می‌دهد.

$$P_0(t+dt) = P_0(t) \times (1 - \lambda \times dt) + P_1(t) \times (\mu \times dt) \quad (9-2)$$

$$P_1(t+dt) = P_1(t) \times (1 - \lambda \times dt) + P_0(t) \times (\mu \times dt) \quad (10-2)$$

با به کار بردن روند رابطه (۱۱-۲) برای رابطه (۹-۲) روابط (۱۲-۲) و (۱۳-۲) برای رابطه (۱۰-۲)، بدست می‌آید. این معادلات را می‌توان به صورت ماتریس (۱۴-۲) نمایش داد.

$$\frac{P_0(t+dt) - P_0(t)}{dt} = -\lambda \times P_0(t) + \mu \times P_1(t) \quad (11-2)$$

اگر  $dt \rightarrow 0$

$$\frac{P_0(t+dt) - P_0(t)}{dt} \Big|_{dt \rightarrow 0} = \frac{P_0'(t)}{dt} = P_0'(t)$$

$$P_0'(t) = -\lambda \times P_0(t) + \mu \times P_1(t) \quad (12-2)$$

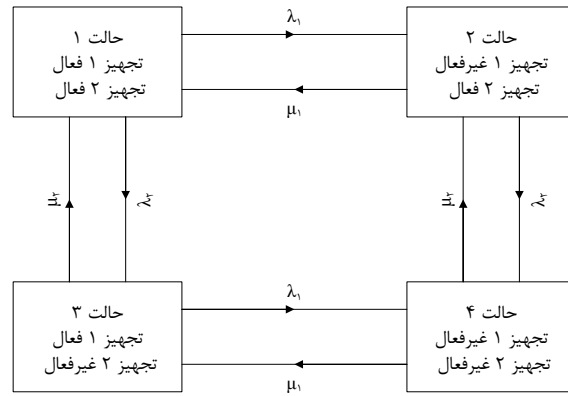
$$P_1'(t) = \lambda \times P_0(t) - \mu \times P_1(t) \quad (13-2)$$

$$\begin{bmatrix} P_0' & P_1' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_0 & P_1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} -\lambda & \lambda \\ \mu & -\mu \end{bmatrix} \quad (14-2)$$

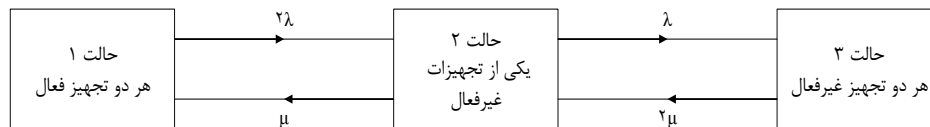
با حل ماتریس (۱۴-۲) به روش‌هایی همچون "لاپلاس"، معادلات وابسته به زمان بدست آورده می‌شود. توجه شود که اگر در معادلات فوق، زمان را برابر با بینهایت در نظر بگیریم، احتمالات فوق همان مقادیر حالت حدی است که پیش از این توضیح داده شد. ولی چون روش گفته شده که بر مبنای ماتریس گذرایی بود آسان‌تر است، برای محاسبات حالت حدی، روش پیشنهادی است. در فرآیند مارکوف شکل (۱-۲)، حالت ۱ حالت فعال، و حالت ۲ حالت غیرفعال است. همچنین حالت ۲ حالت ماندگار (جاذب) است که در آن سیستم با شکست مواجه می‌شود. برای بهتر مشخص شدن حالات مورد بررسی، می‌توان شکل (۲-۲) را در نظر گرفت. این شکل، شکست سیستمی را نشان می‌دهد که دارای دو تجهیز است. با فرض سری بودن این دو تجهیز از دیدگاه قابلیت اطمینان، حالت ۱ به عنوان حالت فعال و دسترس‌پذیر سیستم است. حالت‌های ۲ و ۳ و ۴ را می‌توان با عنوان حالت‌های غیرفعال و یا دسترس‌ناپذیر سیستم بیان کرد. در این سیستم حالت‌های ۲ و ۳ و ۴، حالت جاذب سیستم است و سیستم با شکست مواجه شده است.

در برخی موارد، سیستم دارای مشخصاتی است که می‌توان فرآیند آن را ساده‌تر شده در نظر گرفت. به عنوان مثال اگر در سیستم شکل (۲-۲)، دو تجهیز آورده شده همسان باشند، فرآیند فوق را می‌توان با شکل (۳-۲) نشان داد که دارای ۳ حالت است. با فرض سری بودن تجهیزات از دیدگاه قابلیت اطمینان، حالت ۱ بیان‌گر فعال بودن سیستم، حالت ۲ و ۳ بیان‌گر موقعیت غیرفعال و جاذب سیستم

است. وقتی که سیستم وارد حالت جاذب می‌شود، یعنی با شکست مواجه شده است و برای این که سیستم دوباره شروع به کار کند باید از حالت ۱ دوباره فعال شود (اگر حالت ۱ بیان‌گر شروع سیستم باشد).



شکل (۲-۲) نمودار حالت مکان برای یک سیستم دارای دو تجهیز تعمیرپذیر [۴]



شکل (۳-۲) نمودار حالت مکان برای دو تجهیز یکسان تعمیرپذیر [۴]

وقتی سیستم برای بازه‌های زمانی پشت سر هم، در حالت اجرای روند فرآیند مارکوف است، احتمالی برای این که سیستم وارد حالت جاذب شود، وجود دارد. معمولاً یک بازه زمانی در سیستمی که دارای حالت (حالت‌های) فوق است، تعریف می‌شود که یک شاخص قابلیت اطمینان است. این شاخص بیان می‌کند که میانگین قرار داشتن یک سیستم در یک حالت و به هنگامی که شروع فرآیند مارکوف از حالت خاصی است، تا قبل از وارد شدن به حالت (حالت‌ها) جاذب، چقدر است. به این شاخص، متوسط زمان تا شکست (MTTF) گفته می‌شود. برای محاسبه این شاخص ابتدا سطر و ستون حالت‌های جاذب از ماتریس **P** حذف می‌شود. ماتریس بدست آمده را می‌توان **Q** نام گذاری کرد که ماتریس مختصر شده نام دارد. سپس مطابق رابطه (۲-۱۵) و با توجه به توضیحاتی که در ادامه آورده می‌شود، می‌توان MTTF را محاسبه کرد. توجه شود که **I** ماتریس همانی است.

$$N=[I-Q]^{-1} \quad (15-2)$$

اگر شکل (۳-۲) در نظر گرفته شود، با فرض موازی بودن تجهیزات سیستم از دید قابلیت اطمینان، حالت ۳، حالت جاذب سیستم است. با حذف کردن سر و ستون مربوط به حالت جاذب، ماتریس  $Q$  بدست می‌آید. این ماتریس به همراه ماتریس  $P$  به ترتیب در روابطه (۲-۱۷) و (۲-۱۶) آورده شده است. وقتی  $N$  مطابق روابط گفته شده بدست آورده شده، می‌توان مقادیر بدست آمده برای هر حالت را تعیین کرد. به عنوان مثال  $N_{12}$  در ماتریس فوق بیان‌گر متوسط زمان حضور سیستم در حالت ۲ در زمانی که شروع سیستم از حالت ۱ است، می‌باشد. اگر سیستم از حالت ۱ شروع به کار کند،  $MTTF$  سیستم برابر مجموع درآیه‌ها سطر اول ماتریس  $N$  است.

$$P = \begin{bmatrix} 1-2\times\lambda & 2\times\lambda & 0 \\ \mu & 1-\mu-\lambda & \lambda \\ 0 & 2\times\mu & 1-2\times\mu \end{bmatrix} \quad (16-)$$

(۲)

$$Q = \begin{bmatrix} 1-2\times\lambda & 2\times\lambda \\ 2\times\mu & 1-2\times\mu \end{bmatrix} \quad (17-2)$$

با معکوس کردن مقدار  $MTTF$ ، نرخ شکست سیستم بدست می‌آید که شاخص دیگری برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم است.

### ۳-۲ | روش‌های تعمیر و نگهداری

در بخش گذشته مراحل اجرای تعمیر و نگهداری از سیستم حفاظتی آورده شد. تعمیر و نگهداری به روش‌های گوناگونی اجرا می‌شود. روش‌های تعمیر و نگهداری در سیستم‌های قدرت به چهار دسته زیر تقسیم می‌شوند:

- تعمیر و نگهداری بر پایه زمان<sup>۱</sup>
- تعمیر و نگهداری بر پایه کارایی<sup>۲</sup>.
- تعمیر و نگهداری بر پایه شرایط<sup>۳</sup>.
- تعمیر و نگهداری قابلیت اطمینان محور<sup>۴</sup> [۵]

### ۲-۳-۱ | تعمیر و نگهداری بر پایه زمان

تعمیر و نگهداری بر پایه زمان پرکاربردترین روش تعمیر و نگهداری است که برای گروهی از تجهیزات به کار می‌رود. بازه‌های این نوع از روش‌های تعمیر و نگهداری ممکن است با استفاده از تجربیات قبلی و یا توصیه‌های شرکت‌های تولیدکننده، تغییر کند. بازه‌هایی که برای این نوع از تعمیر و نگهداری تعریف شده، می‌تواند حدود چند ماه تا چند سال باشد.

### ۲-۳-۲ | تعمیر و نگهداری بر پایه کارایی

در تعمیر و نگهداری بر پایه کارایی، بازه‌های تعمیر و نگهداری، بر پایه نتایج تاریخی و تحلیلی از نرخ‌های شکست مربوط به روش تعمیر و نگهداری بر پایه زمان تعیین می‌شوند. به صورت عموم برای استفاده پیوسته از بازه‌های زمانی توسعه یافته تعمیر و نگهداری بر پایه کارایی، بعضی از سطوح تعمیر و نگهداری بر پایه زمان پیروی می‌شود. این کار جهت مشاهده کم‌تر شکست‌های تست و یا شکست‌های داخل سرویس دنبال می‌شوند.

### ۲-۳-۳ | تعمیر و نگهداری بر پایه شرایط

این نوع تعمیر و نگهداری بر پایه نتایج گزارش شده پیوسته و یا گسسته از خود مانیتورینگ غیر مخرب تجهیزات و یا گزارش‌هایی از حالت عملیاتی تجهیزاتی است که در حال کار باقی مانده‌اند. هر

<sup>1</sup> Time-Based Maintenance (TBM)

<sup>2</sup> Performance-Based Maintenance (PBM)

<sup>3</sup> Condition-Based Maintenance (CBM)

<sup>4</sup> Reliability-Centered Maintenance (RCM)

آنچه که توسط این نوع تعمیر و نگهداری انجام می‌گیرد، نیازمند تست دستی نیست اما بهره بردن از آن نیازمند تمرکز تکنیکی دقیق بر روی این است که دقیقاً چه بخشی‌هایی شامل تشخیص خود مانیتورینگ شده‌اند.

## ۲-۳-۴ | تعمیر و نگهداری قابلیت اطمینان محور

تعمیر و نگهداری قابلیت اطمینان محور، تکنیکی برای گسترش برنامه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه است. این نوع تعمیر و نگهداری بر پایه این فرض است که قابلیت اطمینان ذاتی تجهیزات تابع کارکردهای طراحی و کیفیت ساخت است. برنامه تعمیر و نگهداری پیشگیرانه از این که قابلیت اطمینان ذاتی برای سیستم حاصل شده، اطمینان حاصل می‌کند. این نوع تعمیر و نگهداری نمی‌تواند قابلیت اطمینان سیستم را بهبود بخشد. زیرا این کار تنها با طراحی مجدد و یا بروز رسانی ممکن است. بر اساس موسسه تحقیقاتی توان الکتریکی<sup>۱</sup>، تعمیر و نگهداری قابلیت اطمینان محور عبارت است از راهی که کارکردهای سیستم می‌تواند شکست بخورد، ملاحظات اولویت دار محور امنیت و اقتصاد که می‌تواند وظایف تعمیر و نگهداری پیشگیرانه موثر و کاربردی را شناسایی کند. بنابراین تمرکز اصلی تعمیر و نگهداری قابلیت اطمینان محور بر پایه کارکردهای سیستم است و نه تنها سخت افزار سیستم [۵].

## ۲-۴ | سیستم حفاظتی

امروزه با گسترش شبکه‌های قدرت، حفظ قابلیت اطمینان این شبکه در سطح مطلوب اهمیت بالایی دارد. یکی از راهکارها برای رسیدن به این مهم، استفاده از سیستم حفاظتی مناسب است. هر سیستم حفاظتی شامل اجزائی چون ترانسفورماتور جریان، ترانسفورماتور ولتاژ، رله‌ها، سیم‌پیچ‌های مدارشکن و باتری‌ها می‌باشد [۶]. رله<sup>۲</sup> حفاظتی بخش اصلی سیستم حفاظتی است. رله حفاظتی برای شناسایی خطوط و دستگاه دارای ایراد و یا دیگر شرایط خطرناک و غیرعادی سیستم قدرت و برای شروع اقدام

<sup>1</sup> EPRI (Electric Power Research Institute)

<sup>2</sup> Relay

مناسب مدار کنترل، به کار برده می‌شود [۷]. رله‌های حفاظتی به دو دسته قدیمی و مدرن تقسیم می‌شوند که در ادامه به تفصیل شرح داده می‌شوند.

رله‌های قدیمی شامل رله‌های الکترومکانیکی<sup>۱</sup>، الکترومغناطیسی<sup>۲</sup> و استاتیکی<sup>۳</sup> می‌باشد. رله‌های الکترومکانیکی، رله‌هایی هستند که به وسیله حرکت فیزیکی بخش‌های متحرک در نتیجه ایجاد نیروهای الکتروحرارتی، الکترواستاتیک و الکترومغناطیسی توسط کمیت‌های ورودی، عمل می‌کنند. رله الکترومغناطیسی نوعی رله الکترومکانیکی است که اصولاً به وسیله عمل الکترومغناطیسی بخشی که از طریق یک کمیت ورودی انرژی گرفته، عمل می‌کند. اکثر رله‌های الکترومغناطیسی از یکی از پدیده‌های جاذبه/دافعه الکترومغناطیسی، القای الکترومغناطیسی و یا تقویت مغناطیسی استفاده می‌کنند. رله استاتیک رله‌ای است که پاسخ طراحی شده برای آن به وسیله ادوات الکترونیکی، حالت جامد<sup>۴</sup>، مغناطیس و یا دیگر اجزاء بدون حرکت مکانیکی ایجاد شده باشد.

رله‌های مدرن شامل رله‌های دیجیتال و رله‌های عددی است. در رله‌های دیجیتال از ریزپردازنده برای پردازش استفاده می‌شود. در حالی که در رله‌های عددی از DSP، برای پردازش استفاده می‌گردد. در این رله‌ها با توجه به پردازش‌های انجام شده و تنظیمات رله‌ها، فرمان حفاظتی مناسب تعیین می‌شود. در ادامه به پاره‌ای از مفاهیم مرتبط با سیستم حفاظتی و قابلیت اطمینان این سیستم و روش‌های تعمیر و نگهداری آن پرداخته می‌شود.

## ۲-۴-۱ | قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی

به منظور بهبود قابلیت اطمینان یک شبکه قدرت، لازم است سیستم حفاظتی دارای قابلیت اطمینان باشد. قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی با بررسی دو شاخص قابلیت اتکا<sup>۵</sup> و امنیت<sup>۶</sup>، ارزیابی می‌شود.

---

<sup>1</sup> Electromechanical Relay

<sup>2</sup> Electromagnetic Relay

<sup>3</sup> Static Relay

<sup>4</sup> Solid State

<sup>5</sup> Dependability

<sup>6</sup> Security



منظور از قابلیت اتکای سیستم حفاظتی، احتمال عملکرد درست سیستم حفاظتی در زمانی است که نیاز به عملکرد آن می‌باشد. همچنین امنیت یک سیستم حفاظتی بیانگر اشتباه عملکردن سیستم حفاظتی در هنگامی است که نیاز به عملکرد آن نمی‌باشد. با طراحی و به‌کارگیری متعدد رله‌ها می‌توان به صورت نسبی به قابلیت اتکای مطلوب برای سیستم دست پیدا کرد. اما حفظ امنیت سیستم حفاظتی نسبتاً دشوار است و لازم است تست‌ها و آزمایشات پرشماری برای شبیه‌سازی تمام شرایطی که رله در معرض آن است، انجام گیرد. راهکارهای متنوعی در حیطه مهندسی همچون استفاده از روش‌های پشتیبان محلی و روش‌های پشتیبان از راه دور می‌تواند قابلیت اتکا را افزایش دهد. امنیت سیستم حفاظتی را نیز می‌توان به وسیله چندین راهکار از جمله بهبود تست‌های خودبازبینی و مانیتورینگ و استفاده از اجزاء با کیفیت افزایش داد.

## ۲-۴-۲ | تست‌های سیستم‌های حفاظتی

برای اطمینان از عملکرد صحیح سیستم‌های حفاظتی و اجزاء تشکیل‌دهنده آن‌ها، آزمایشات مشخصی روی آنها انجام می‌گیرد. تعدادی از این آزمایشات در این بخش شرح داده می‌شوند [۶].

## ۲-۴-۲-۱ | انواع تست‌های کاربردی برای سیستم حفاظتی

برای اطمینان از عملکرد صحیح سیستم حفاظتی، این سیستم توسط تست‌های گوناگونی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، از جمله این تست‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- تست‌های گواهینامه: این تست‌ها دارای دو زیرمجموعه شامل تست‌های انطباقی<sup>۱</sup> و تست‌های کارایی<sup>۲</sup> می‌باشند:

○ تست‌های انطباقی: هدف از تست‌های انطباقی تایید کارایی ابزار و یا سیستم حفاظتی در برابر

تنظیماتی است که با تنظیمات از پیش تعیین شده مغایرت دارد. این تست‌ها به دو دسته

---

<sup>1</sup> Conformance Tests

<sup>2</sup> Performance Tests

تست‌های انطباقی عملکردی<sup>۱</sup> و تست‌های انطباقی تکنولوژیکی<sup>۲</sup> تقسیم‌بندی می‌شوند.

○ تست‌های کارایی: تست‌های کارایی نوعی تست انطباقی هستند که محدودیت‌های کارایی

رله‌های حفاظتی استفاده شده در کاربردهای خاص را توصیف می‌کنند.

تست‌های انطباق و کارایی به دو دسته تست‌های کارایی عملکردی<sup>۳</sup> و تست‌های کارایی طرح<sup>۴</sup>

تقسیم می‌شوند.

• تست‌های کاربردی<sup>۵</sup>: تست‌های کاربردی به وسیله کاربر و برای مشخص کردن متناسب بودن

رله برای سیستم حفاظتی که برای محل یا کاربرد خاصی طراحی شده‌اند، به کار می‌روند.

• تست‌های راه‌اندازی<sup>۶</sup>: تست‌های راه‌اندازی برای اطلاع از عملکرد صحیح سیستم حفاظتی مطابق

طراحی‌های قبلی و پس از نصب میدانی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

• تست‌های تعمیر و نگهداری<sup>۷</sup>: تست‌های تعمیر و نگهداری برای تایید عملکرد صحیح سیستم

کنترل و حفاظت پس از سپری شدن دوره‌ای از زمان نصب، به کار می‌روند.

## ۲-۴-۲ | فعالیت انجام شده برای تعمیرات و نگهداری سیستم حفاظتی

طبق استاندارد NERC<sup>۸</sup> تست‌های زیر در هنگام تعمیر و نگهداری سیستم حفاظتی انجام می‌شود

[۸]:

- ورودی‌های رله.
- منابع رله.
- رله‌های حفاظتی.

<sup>1</sup> Functional Conformance Tests

<sup>2</sup> Technological Conformance Tests

<sup>3</sup> Functional Performance Tests

<sup>4</sup> Scheme Performance Tests

<sup>5</sup> Application Tests

<sup>6</sup> Commissioning Tests

<sup>7</sup> Maintenance Tests

<sup>8</sup> North American Electric Reliability Corporation

- خروجی‌های رله.
  - تجهیزات مرتبط مخابراتی.
  - ابزار حسگر ولتاژ و جریان، که ورودی‌ها را برای رله‌های حفاظتی فراهم می‌کنند.
  - ایستگاه منبع DC مرتبط با عملگرها.
  - مدارهای کنترل در ارتباط با عملگرهای حفاظتی.
- به هنگام تعمیر و نگهداری معمول برای سیستم رله حفاظتی، حداقل مراحل زیر باید اجرا شود:
- تأیید تمام ورودی‌های رله شامل: ولتاژها، جریان‌ها (شامل نسبت‌های ترانسفورماتور جریان)، سیگنال‌های پایلوت، سیگنال‌های کنترل.
  - تأیید عملکرد منحصر رله شامل: زمانبندی، تنظیمات و دقت.
  - تأیید تمام خروجی‌های رله شامل: فرمان‌های قطع، سیگنال بستن، سیگنال‌های پایلوت و یا گردش انتقال حالت اولیه قطع کننده شکست، هشدارها، و غیره برای تمام گروه‌های تنظیمات اگر قابل اجرا باشد.
  - اعمال تست گردشی عملکردی برای مدارشکن‌ها.
  - اجرای تست عملکردی برای تمام رله‌های کمکی، شامل رله‌های قفل کننده.
  - اعمال تست‌های در مدار بودن و بار.
  - اعمال تست کردن انتها به انتها<sup>۱</sup> زمانی که طرح رله وابسته به مقادیری از دیگر انتها است. همانند حفاظت دیفرانسیل خط.
- نوع تست، گسترش و تنوع بازه‌ها، به انواع رله‌ها استفاده شده و این که چگونگی اعمال آن‌ها وابسته است. رله‌های الکترومکانیکی و قدیمی که به صورت عموم فاقد مانیتورینگ اتوماتیک کافی برای هشدار و یا غیرفعال کردن رله‌های شکست خورده هستند، باید با تکرار بیش‌تری مورد تعمیر و نگهداری قرار گیرند.

---

<sup>1</sup> End to End

## ۲-۵ | راهکارهای افزایش قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی

راهکارهای مختلفی برای افزایش قابلیت اطمینان رله‌های حفاظتی وجود دارد که انجام تست دوره‌ای<sup>۱</sup>، یکی از این راهکارها است. در رله‌های نسل جدید علاوه بر تست دوره‌ای، تست مانیتورینگ<sup>۲</sup> و تست خودبازبینی<sup>۳</sup> نیز سبب بهبود قابلیت اطمینان رله‌های حفاظتی می‌شود.

### ۲-۵-۱ | تست دوره‌ای

تستی که به صورت متناوب برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی، دستیابی به دسترس‌پذیری بالا و همچنین حفظ کیفیت اجزاء، اجرا می‌شود. برای این که دسترس‌پذیری سیستم بیشینه گردد، زمان این تست باید بهینه شود. در رله‌های امروزی که مجهز به تست‌های خودبازبینی و مانیتورینگ هستند، بازه زمانی اجرای تست دوره‌ای افزایش پیدا کرده است.

### ۲-۵-۲ | تست مانیتورینگ

تکنیک‌های مانیتورینگ برای عملکرد پیوسته سیستم طراحی شده‌اند و می‌تواند برای اهداف زیر مورد استفاده قرار گیرند [۹]:

- شناسایی دسترس‌ناپذیری ماژول.
- کاهش گرایش به عملکرد اشتباه.
- جلوگیری از عملکرد اشتباه.

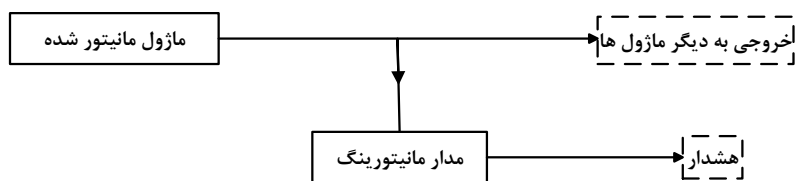
مدار تست مانیتورینگ در شکل (۲-۴) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که سیستم حفاظتی در حین انجام تست مانیتورینگ می‌تواند وظایف خود را انجام دهد.

---

<sup>1</sup> Routine Test

<sup>2</sup> Monitoring Test

<sup>3</sup> Selfchecking Test



شکل (۴-۲) نحوه عملکرد تست مانیتورینگ [۹]

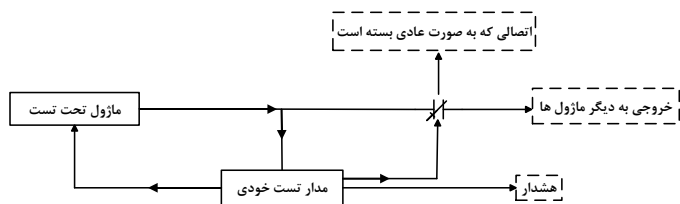
## ۳-۵-۲ | تست خودبازبینی

تست خود بازبینی برای ارزیابی قابلیت اجرای سیستم حفاظتی طراحی شده است. که به صورت متناوب و در بازه زمانی بسیار کوتاه اجرا می‌شود. به هنگام اجرای این تست کل و یا بخشی از سیستم حفاظتی از سرویس خارج می‌شود. مدار شکل خودبازبینی در شکل (۵-۲) نشان داده شده است. تاکنون چندین روش برای اجرای تست خودبازبینی مطرح شده است که از جمله آن می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [۹]:

۱. اعمال جریان‌ها و ولتاژهای مصنوعی به ورودی‌های سیستم حفاظتی، برای شرایط خاصی که سیستم حفاظتی باید پاسخگوی آن باشد.

۲. اعمال سیگنال‌های تست، تنها به قسمت ورودی مدارهای سیستم حفاظتی.

تست‌های خودبازبینی و مانیتورینگ، میانگین دسترس‌ناپذیری به سیستم حفاظتی را کاهش می‌دهند. همچنین بعضی از سیستم‌های مانیتورینگ و خودبازبینی می‌توانند احتمال شکست‌های امنیتی سیستم حفاظتی را کاهش دهند. از نکات منفی این تست‌ها گران بودن اعمال آن‌ها به بعضی بخش‌های سیستم حفاظتی است. همچنین تست خودبازبینی سیستم حفاظتی را از حالت عملیاتی خارج می‌کند که در نتیجه باعث افزایش دسترس‌ناپذیری به سیستم حفاظتی می‌شود. استفاده مؤثر از این تست‌ها نیازمند طراحی عالی سیستم‌های مانیتورینگ و خودبازبینی است.



شکل (۵-۲) نحوه عملکرد تست خودبازبینی [۹]

## ۲-۶ | خطای انسانی

عملکردهای انسانی از عوامل تأثیرگذار بر روی قابلیت اطمینان سیستم قدرت است. تحقیقات پیرامون خطای انسانی پیشینه طولانی دارد. خطای انسانی در پژوهش‌های گوناگون مورد مطالعه قرار گرفته است. در ادامه پیشینه تاریخی، تعریف و طبقه‌بندی‌های ارائه شده برای این خطا، شرح داده می‌شود.

### ۲-۶-۱ | تعریف خطای انسانی

دو تعریف برای خطای انسانی آورده شده است [۱]:

۱. هر عضوی از مجموعه فعالیت‌های انسانی که از برخی محدودیت‌های قابل قبول فراتر رود.
۲. شکست در اجرای فعالیت از پیش توصیف شده که می‌تواند موجب آسیب رسیدن به تجهیزات و یا ویژگی مربوط به عملکرد آن تجهیزات و یا اختلالات در فعالیت‌های برنامه‌ریزی شده آنها شود.

به هر کدام از این دو تعریف، اگر شامل نکات زیر نباشد، ایراداتی وارد است:

۱. شرایط عملیاتی که فعالیت انسانی از پیش تعیین شده برای آن طراحی شده، مهیا و قابل بازرسی باشد.

۲. انسان برای این که فعالیت از پیش توصیف شده را تحمل کند باید به صورت کامل به صورت فیزیکی و ذهنی با شرایط آشنایی پیدا کرده باشد.

خطای انسانی می‌تواند یکی از دلایل کاهش قابلیت اطمینان سیستم باشد. خطای انسانی ممکن است در برنامه‌ریزی، طراحی، ساخت یا بهره‌برداری از ساختار مشاهده شود. این خطا باعث تعداد قابل توجهی از شکست‌های ساختاری (به خصوص در طراحی) می‌شود. برای بررسی خطای انسانی لازم است قبل از مدل کردن تمام سیستم، کار تکی (رفتار کوچک<sup>۱</sup>) در ارتباط با خطاهای انسانی فهمیده شود

---

<sup>1</sup> Micro Task

[۱۰]. داده‌های حاصل از خطای انسانی نشان می‌دهند که اندازه‌گیری تأثیر خطای انسانی بی‌نهایت دشوار است. شواهد و مدارک نشان می‌دهند که خطای انسانی صرفاً به دلیل غفلت نیست و به وسیله شرایطی همچون روحیه ضعیف، فشار زمانی و بی‌تجربگی که امکان خطا را به وجود می‌آورند، اتفاق می‌افتد. دلایل زیادی برای به وجود آمدن خطای انسانی وجود دارد که مسائل روانشناسی، جامعه‌شناسی و زمینه‌های فیزیکی جزئی از آنها هستند. وقتی صحبت از خطای انسانی می‌شود، اپراتورهای انسانی به عنوان عامل‌های ایجاد کننده خطا مطرح می‌شوند. در مرجع [۱۲] اشاره شده که اپراتورهای انسانی برای پیدا کردن راه حل با توجه به اخطار داده شده در شرایط معمولی و همچنین در موقعیت‌های غیرمنتظره، می‌بایست در زمان حقیقی پاسخ‌گو باشند. اپراتورها بر اساس مشاهده، توجه و پاسخ، به سیگنال‌های دیداری و شنیداری عکس‌العمل خاصی نشان می‌دهند. در زندگی روزمره، بیش‌تر اطلاعات درک شده به وسیله چشم‌ها است ولی سیگنال‌های شنیداری سریع‌تر قابل درک می‌باشند. عامل‌های شکل‌دهنده کارایی<sup>۱</sup> از عوامل تأثیر گذار بر روی اپراتورهای انسانی هستند. عامل‌های شکل‌دهنده کارایی، رفتار و کارایی انسانی را در جهت مثبت و منفی تحت تأثیر قرار می‌دهند [۱۴]. این عامل‌ها به صورت گسترده به دو صورت زیر می‌باشند:

۱. خارجی: عامل‌هایی که ناشی از تأثیر محیط بر روی اپراتور است. همانند: پیچیدگی وظیفه.

۲. داخلی: عامل‌هایی که می‌تواند از خصوصیات داخلی اپراتور باشند. همانند: آموزش اپراتور.

این نکته قابل ذکر است که هیچ پذیرش جامعی درباره این عامل‌ها وجود ندارد. خطای انسانی یک رفتار انسانی است و بر این اساس، عامل‌های شکل‌دهنده کارایی که باعث خطای انسانی می‌شوند باید به طور کلی حذف شود و یا اینکه بهبود یابند، که در این صورت احتمال وقوع خطای انسانی کاهش می‌یابد.

---

<sup>1</sup> Performance Shaping Factors (PSFs)

## ۲-۶-۲ | طبقه‌بندی خطای انسانی

ریشه تحقیق پیرامون خطای انسانی، در روانشناسی و فهم شناختی در اثر مقابل میان انسان و تکنولوژی است. خطا در تجهیزات می‌تواند تا موقع طراحی سیستم پنهان بماند و زمان زیادی تا شناسایی آن طول بکشد، که در نتیجه هزینه زیادی را برای اصلاح به بار می‌آورد و این هزینه با گسترش سیستم افزایش می‌یابد. از آنجا که اصلاح خطاها در مهندسی تجهیزات و کل روند توسعه لازم است، هزینه اصلاح این خطاها و نیز استراتژی اصلاح آن، موضوع اجتناب از خطا را به جای شناسایی آن جذاب می‌کند. از مزایای این نگرش می‌توان به صرفه‌جویی در زمان تکمیل سیستم، صرفه‌جویی در هزینه و اجتناب از دوباره‌کاری نام برد. نکته کلیدی برای بهره‌بردن از این مزایا کار گروهی است و برای موفقیت در کار گروهی باید به فعالیت‌های انسانی پی برده شود.

وقتی در حوزه خطای انسانی، پیرامون عامل‌های انسانی تحقیق صورت می‌گیرد، معمولاً تمایز مهمی میان خطا و لغزش<sup>۱</sup> از یک طرف و اشتباه<sup>۲</sup> در طرف دیگر وجود دارد. در تعریفی که راس موسن<sup>۳</sup> آورده است، لغزش و خطا بوسیله تمرین و مهارت‌های قبل از تمرین فهمیده می‌شود در حالی که اشتباه ریشه در استفاده نامناسب از قوانین دارد و به ایراداتی که به دانش پیرامون این موضوع برمی‌گردد، ارتباط پیدا نمی‌کند [۱۱]. تحقیقات جیمز ریزون<sup>۴</sup> بر روی چنین مواردی به شرح زیر است.

## ۲-۶-۲-۱ | خطا و لغزش

خطا و لغزش در مرحله‌ای از اجرا یا ذخیره‌سازی کار و به دلیل در نظر نگرفتن این موضوع که آیا طرحی که اجرا شده است به اندازه کافی هدف مورد نظر را برآورده می‌کند یا خیر، ایجاد می‌شود. خطا و لغزش اغلب به هنگام اجرای وظایف منظم و آشنا در محیط‌های معمول آن‌ها، مشاهده می‌شود. طبقه‌بندی شکست‌های ناشی از آن به صورت زیر است:

---

<sup>1</sup> Slip & Lapse

<sup>2</sup> Mistake

<sup>3</sup> Jens Rasmussen

<sup>4</sup> James Reason



● شکست‌های شناختی<sup>۱</sup>: این شکست به دلیل لغزش‌هایی که ریشه آن‌ها شناسایی نادرست و یا شناسایی نکردن جزئیات مهم طرح است، به وجود می‌آید. این شکست‌ها ناشی از موارد زیر است:

۱. شناسایی اشتباه ۲. غیرقابل تشخیص بودن جزئیات طرح ۳. مثبت کاذب<sup>۲</sup> (شناسایی اشتباه مسائلی که در اصل وجود ندارند).

● شکست‌های توجهی: این شکست رایج‌ترین نوع شکست است و مبنای این شکست دو نوع لغزش است:

○ لغزش ناشی از عدم توجه: به طور مثال توجه به جزئیاتی غیر از جزئیات اصلی یک موقعیت کاری، ممکن است موجب بروز این لغزش شود.

○ لغزش ناشی از توجه بیش از حد: این لغزش، اغلب به دلیل تلاش برای جبران خطایی که به سبب توجه زود هنگام به یک وظیفه کاری و مواردی هم چون چک کردن بی موقع به وجود می‌آید.

● شکست‌های حافظه: این شکست‌ها که به صورت عموم ناشی از خطا<sup>۳</sup> می‌باشند، به سبب نادیده گرفتن برخی فعالیت‌های مهم که در توالی فعالیت‌های برنامه‌ریزی شده قرار دارند، ایجاد می‌شود.

● شکست‌های انتخابی: این شکست‌ها زمانی اتفاق می‌افتند که شخص اجرا کننده درگیر چندین برنامه‌ریزی متفاوت پشت سر هم و به صورت هم زمان است.

آن چیزی که لغزش و خطا را از دیگر فرم‌های خطای انسانی متمایز می‌سازد، طبیعت وظیفه‌ای است که باید اجرا شود. انسان در انجام کارهای منظم‌تر و آشناتر و همچنین کارهای بر مبنای مهارت بیشتر مستعد انجام خطا است. وقتی شرایط کمتر آشنا و منظم است (شرایطی که رفتار انسانی بر پایه مهارت،

---

<sup>1</sup> Recognition Failure

<sup>2</sup> False Positives

<sup>3</sup> Lapse

کمتر در آن دخیل است)، انسان به منظور کامل کردن وظایف، باید به سمت رفتارهای بر مبنای قوانین و دانش پیش برود. خطاهای انسانی در این موقعیت کمتر بعنوان لغزش شناخته می‌شوند و عموماً به عنوان اشتباه بیان می‌شوند.

## ۲-۶-۲ | اشتباهات

اشتباهات به عنوان ناکارآمدی و شکست در تصمیم‌گیری و روندهای استنباطی، که با توانایی در انتخاب هدف و برآورده کردن آن در ارتباط است، تعریف می‌شود (جدا از اینکه آیا فعالیتی که به وسیله‌ی این تصمیم گرفته شده و شیوه اجرای این فعالیت، بر اساس برنامه پیش می‌رود یا خیر). اشتباهات به دو دسته تقسیم می‌شوند:

• اشتباهات بر پایه قانون: احتمال وقوع این نوع هنگامی وجود دارد که انسان به فعالیت حل

مسئله در حیطه‌ای نسبتاً آشنا مشغول باشد. این روند از دو نقطه اساسی آسیب‌پذیر است:

۱. تقسیم‌بندی موقعیت ۲. انتخاب راه حل

شکست‌ها در این دو نقطه به دو زیر سطح خطا تقسیم می‌شوند:

۱. عدم کاربرد قوانین درست ۲. کاربرد قوانین غلط

• این اشتباهات زمانی به وجود می‌آید که فردی بدون مراجعه به راه‌های مبتنی بر قانون، راه

حل‌های جدیدی را برای مشکلات ایجاد و یا برنامه‌های کاملاً جدیدی را برای اقدام، تدوین

کند.

## ۲-۶-۳ | تخلف<sup>۱</sup>

تخلف به انحراف از روند عملیاتی، تمرین‌ها، راه و روش‌ها، استانداردها و یا قوانین ایمن گفته می‌شود.

انحراف‌ها می‌تواند حساب شده و یا اشتباهی باشد. تخلف دارای به زیر مجموعه‌های تخلف بر پایه قانون،

بر پایه دانش تخلف و بر پایه مهارت است.

---

<sup>1</sup> Violation

- تخلف بر پایه قانون: این تخلف را می‌توان به عنوان تخلفات موقعیتی نیز نام برد زیرا آنها معمولاً شامل شکستن رویه‌های محدود کننده با توجه به موارد خاص موقعیتی هستند.
- تخلفات بر پایه دانش: این تخلفات به صورت عموم زمانی وجود دارد که موقعیتی استثنایی و ناآشنا برای عمل کننده باشد.
- تخلف بر پایه مهارت: تخلفاتی که در برخی زمینه‌های تمرینی ایمن به وسیله کارکنان دارای مهارت و در حال کار منظم، رخ می‌دهند.

## ۲-۶-۳ | آنالیز قابلیت اطمینان انسانی

با ردگیری آنالیز قابلیت اطمینان انسانی، منشا آن به داده‌های یک موسسه تحقیقاتی آمریکایی در زمینه احتمالات خطای انسانی باز می‌گردد که با دسته‌ای از احتمالات خطای انسانی سر و کار داشته است. سویین<sup>۱</sup> که در زمینه‌ی احتمالات خطای انسانی کار می‌کرد بعدها نشان داد این احتمالات برای استفاده از نظر ریاضی ناکافی است. اولین تحقیق رسمی در زمینه خطای انسانی به وسیله او و در سال ۱۹۸۳ همراه با بانک نرخ خطای انسانی ساندا<sup>۲</sup> انجام شد. این تحقیق شامل متغیرهای محیطی و همچنین تعدادی وظایف بود. این وظایف باید خاصیت‌هایی را که در طراحی انجام شده توسط مهندسی انسانی برای تخمین احتمالات خطای انسانی وجود داشت، شناسایی می‌کرد [۱۳].

برای سیستم‌های پیچیده همچون سیستم قدرت، که تعداد زیادی از اثرات متقابل انسان و سیستم وجود دارد، آنالیز قابلیت اطمینان انسانی<sup>۳</sup>، عنصر مهمی از ارزیابی امنیت احتمالی برای اطمینان از ارزیابی واقعی امنیت است. بخشی از اثرات متقابل را می‌توان خطاهای در طول نصب کردن، تست کردن، تعمیر و نگهداری تجهیزات و اثرات متقابل به هنگام تصادفات نام برد

ارزیابی قابلیت اطمینان به سوالات زیر پاسخ می‌دهد [۱۵]:

<sup>1</sup> Swain

<sup>2</sup> Sandia Human Error Rate Bank

<sup>3</sup> Human Reliability Analysis (HRA)

- چه نوع از خطای انسانی ممکن است مشاهده شود؟
- احتمال خطای به وجود آمده چقدر تخمین زده می‌شود؟
- چه عامل‌هایی بر این احتمال تأثیر دارد؟
- چگونه خطاهای انسانی در طراحی شناسایی شده‌اند و چگونه تأثیر آن‌ها به وسیله کنترل‌های اضافی کاهش می‌یابد؟

هر ارزیابی قابلیت اطمینان انسانی که بدون روند شناسایی و کمیت‌سنجی کافی صورت گرفته باشد احتمالاً غیردقیق خواهد بود. با گسترش ارزیابی قابلیت اطمینان انسانی، روش‌های مختلفی برای آنالیز خطای انسانی ایجاد شده‌اند. روش‌هایی همچون تکنیک پیش‌بینی نرخ خطای انسانی<sup>۱</sup>، قابلیت اطمینان شناختی و روش آنالیز خطا<sup>۲</sup>، ارزیابی خطای انسانی، تکنیک کاهش هارت، تکنیک آنالیز خطای انسانی<sup>۳</sup>. هرچند که در برخی مراجع، قابلیت اطمینان انسانی با استفاده از مدل مارکوف ارزیابی شده است. شایان ذکر است که اغلب این روش‌ها (غیر از مدل مارکوف) برای صنعت‌های غیر از سیستم قدرت استفاده شده و مخصوص سیستم‌های قدرت نمی‌باشند. طبق تحقیق و بررسی‌ها، سناریوهای ارزیابی عملکرد سیستم قدرت به ۳ دسته تقسیم‌بندی شده است [۱۶]:

- سناریوهای زمان محور<sup>۴</sup>.
- سناریوهای فرآیند محور<sup>۵</sup>.
- سناریوهای اضطرار محور<sup>۶</sup>.

## ۷-۲ | جمع‌بندی

مطالبی که در این فصل ارائه شد، مربوط مبانی نظری است که این پایان‌نامه بر اساس آن‌ها نگارش

<sup>1</sup> Technique for Human Error Rate Prediction (THERP)

<sup>2</sup> Cognitive Reliability And Error Analysis Method (CREAM)

<sup>3</sup> A Technique for Human Error Analysis (ATHEANA)

<sup>4</sup> Time-Centered HRA (TCHRA)

<sup>5</sup> Process-Centered HRA (PCHRA)

<sup>6</sup> Emergency-Centered HRA (ECHRA)

شده است. تاثیر خطای انسانی بر روی زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی به وسیله فرآیند مارکوف ارزیابی می‌شود. این روش، یک روش آنالیزی برای مدلسازی ریاضی یک سیستم است. فرآیند مارکوف برای ارزیابی سیستم‌هایی به کار گرفته می‌شود که در مکان به صورت گسسته وجود دارند ولی در زمان به صورت پیوسته عمل می‌کنند.

فصل سوم

تاریخچه موضوع و مروری بر پژوهش‌های

انجام شده

## ۱-۳ | مقدمه

در این فصل، مطالعات انجام شده در زمینه خطای انسانی و تعیین زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

## ۲-۳ | بررسی مطالعات انجام شده در زمینه خطای انسانی

خطای انسانی سبب بروز حوادث ناگواری در صنعت شده است. از جمله این حوادث می‌توان به حادثه اتمی تری مایل ایسلند<sup>۱</sup> [۲۰] در تاریخ ۲۸ مارس ۱۹۷۹، حادثه فضایی چلنجر<sup>۲</sup> [۲۱] در ۲۲ ژوئن ۱۹۸۶ و حادثه اتمی چرنوبیل<sup>۳</sup> [۲۲] در ۲۶ آوریل ۱۹۸۶ اشاره کرد. تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه خطای انسانی انجام شده است. زمینه‌های اصلی مطالعات خطای انسانی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

- ماهیت خطای انسانی.
- طبقه‌بندی خطای انسانی.
- عوامل تأثیرگذار بر روی خطای انسانی.
- بررسی تأثیرگذاری خطای انسانی بر روی صنایع.
- بررسی نحوه تأثیرگذاری خطای انسانی در سازمان‌ها.
- چگونگی ارزیابی خطای انسانی.
- چگونگی مدلسازی خطای انسانی.

وجود زمینه‌های مطالعاتی متنوع و گسترده در حوزه خطای انسانی، این موضوع را به سوژه‌ای جذاب برای دانشمندان تبدیل کرده که در این بخش برخی از پژوهش‌های انجام شده در مراجع علمی معتبر مورد بررسی قرار گرفته است.

---

<sup>1</sup> Three Mile Island Accident

<sup>2</sup> Challenger Accident

<sup>3</sup> Chernobyl Accident

در مرجع [۲۳] فرمول دسترس‌ناپذیری برای چندین ساختار رایج منطقی از راه محاسبات ریاضی توسعه داده شده است. در این ارتباط، با شبیه‌سازی یک برنامه آزمایشی، احتمال شکست اجزاء به سبب خطای انسانی در نظر گرفته شده است. این برنامه آموزشی برای شبیه‌سازی تأثیر خطای انسانی بر روی دو شیر ایزولاسیون نیروگاه هسته‌ای به کار گرفته شده است. این دو شیر سیستم افزونگی این نیروگاه به حساب می‌آیند.

مرجع [۲۴]، تأثیرات دو نوع خطای انسانی را در تخمین زمان بهینه میان بازرسی‌های سیستم نیروگاه هسته‌ای، توسط مدل مارکوف ارزیابی می‌کند. این تحقیق برای ارزیابی امنیت این نیروگاه انجام گرفته است. در تحقیق انجام گرفته امکان اینکه سیستم با امنیت پایین، با بازرسی شناسایی نشود (نوعی از خطای انسانی)، همانند امکان اینکه سیستم با امنیت خوب سهواً بعد از بازرسی در حالت بد قرار گیرد (نوعی دیگر از خطای انسانی)، در نظر گرفته شده است. مدل فوق برای بدست آوردن دسترس‌پذیری حالت ایستای سیستم ایمنی گسترش داده شده است.

خطای انسانی در دو برنامه آزمایشی مربوط به اعطای گواهینامه اداره هوانوردی فدرال برای تعمیر و نگهداری نیروگاه هسته‌ای با حضور کارآموزان برنامه فوق در مرجع [۲۵] تحلیل شده است. هدف این مقاله، گسترش و تخمین طرح مورد نظر جهت تقسیم‌بندی خطای انسانی در وظایف عیب‌یابی است. آنالیز روش‌های آموزشی که بر اساس نتایج بدست آمده انجام شده است، نشان‌دهنده کاهش خطاها به سبب استفاده از روش پیشنهادی است.

مرجع [۲۷] چهار مدل ریاضی بر پایه زنجیره مارکوف را برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های افزونگی<sup>۱</sup>، تحت خطای انسانی بحرانی توصیف کرده و معادلات مربوط به قابلیت اطمینان سیستم، احتمالات حالت و MTTF را ارائه داده است. تأثیر خطای انسانی بحرانی بر قابلیت اطمینان سیستم و حالت ایستا برای تمام مدل‌های ریاضی در این مرجع بررسی شده است.

مرجع [۲۸] به بررسی تعمیر و نگهداری از سیستم قدرت می‌پردازد. در این پژوهش، یک مدل

---

<sup>1</sup> Redundant system



مفهومی از وظایف تعمیر و نگهداری ارائه شده که به منظور تسهیل شناسایی ریشه خطاهای انسانی، بهبود امنیت و کارایی طرح‌ها در نیروگاه‌های اتمی استفاده می‌شود. بر اساس نتایج پیشنهادهایی مطرح شده که به شرح زیر است:

- پیشنهاد سیاست‌های مشخصی برای جلوگیری از خطای انسانی و تصحیح آن.
- پیشنهاد استفاده از سیاست‌های تمرینی برای پرسنل.

مرجع [۱۹] با هدف گسترش روشی برای تخمین احتمال ارتکاب خطاهای ناشی از تصمیم‌گیری<sup>۱</sup> در صنعت هسته‌ای<sup>۲</sup> نوشته شده است. این مرجع دو روش "سیستم انسانی"<sup>۳</sup> و "مسیر پنهانی"<sup>۴</sup> را برای شناسایی ۲۰ خطای بالقوه معرفی کرده است. این دو روش دارای ویژگی‌هایی هستند که شاید بتوانند فعالیت‌های نادرست را آشکار کنند. نویسندگان معتقد است که عامل‌های شکل‌دهنده کارایی<sup>۵</sup>، تأثیرات زیادی بر روی سیستم دارند و در برخی موارد (همانند آموزش) می‌توانند برای تقویت منابع فکری که توسط انسان‌ها استفاده می‌شوند به کار روند.

مرجع [۱۰] مدل‌های ریاضی از خطای مشاهده شده پیشنهاد داده است که برای آنالیز قابلیت اطمینان انسانی مناسب است. این مدل بر روی داده‌های حقیقی تطبیق داده شده که از روش‌های مهندسی بدست آمده است. مدل مزبور را می‌توان برای بدست آوردن اطلاعات بهره‌خطا مورد استفاده قرار داد. نتایج نشان می‌دهد که در نظر گرفتن تفاوت بین خصوصیات نرخ خطا می‌تواند به صورت مؤثر جایگزین تخمین‌های قابلیت اطمینان ساختاری<sup>۶</sup> شود که از تحلیل قابلیت اطمینان انسانی حاصل می‌گردد.

در یک مطالعه جدید جمع‌آوری اطلاعات پیرامون تخلیه قایق نجات ارائه شده است [۳۰]. این مقاله به صورت اصلی به بخش میانی روند ارزیابی قابلیت اطمینان انسانی که کمیت‌سنجی، راستی‌آزمایی و

---

<sup>1</sup> Decisionbased errors

<sup>2</sup> Nuclear industry

<sup>3</sup> Human System (HSYS)

<sup>4</sup> SNEAK

<sup>5</sup> PSF(Performance Shaping Factors)

<sup>6</sup> Structural Reliability Estimates

احتمال خطای انسانی است، می‌پردازد. بر اساس نتایج احتمال خطای انسانی بالا و نامطلوب دلیل برخی خطاهای اتفاق افتاده، تشخیص داده شده است.

مرجع [۱۱] به طبقه‌بندی کامل خطای انسانی پرداخته است. این پژوهش برای اطلاع‌رسانی تلاش‌های صورت گرفته جهت بهبود روند گسترش سیستم‌ها برای افزایش قابلیت اتکا، و به خصوص برای ارزیابی روند نیازمندی‌های مهندسی نوشته شده است.

مرجع [۱۳] چهارچوب کاری شناسایی و خاصیت‌سنجی خطای انسانی تعمیم یافته جدیدی را توصیف کرده است که با شکل‌های گوناگونی از خطای انسانی در سطوح مختلف تحلیل سر و کار دارد. نویسنده، کار بر روی خطای انسانی را یک کار شخصی ندانسته بلکه یک کار سازمانی می‌داند.

مرجع [۱۴] نگاهی به ارزیابی ایمنی احتمالی<sup>۱</sup> (روشی برای آگاهی از توالی تصادفات بالقوه) در آنالیز قابلیت اطمینان انسانی داشته است. پیشنهاد‌های این مقاله برای توصیف چگونگی آنالیز قابلیت اطمینان انسانی در زمینه ارزیابی ایمنی احتمالی برای مهندسی انرژی است. مطابق نتایج، ارزیابی ایمنی احتمالی می‌تواند برای تشخیص حرکت‌های مخاطره آمیز و به صورت مؤثرتری برای شناسایی طراحی بهینه و تصمیم‌گیری عملیاتی، مورد استفاده قرار گیرد.

مرجع [۳۱] از آمارهای بدست آمده از یک نظرسنجی پیرامون تجهیزات یک موسسه تحقیقاتی برای بررسی کیفیت ساختار پنل‌های سقفی استفاده کرده و دقت کار مورد نظر را که پیرامون پنل‌های سقفی است، مدلسازی کرده است. در این مقاله به تأثیر خطای انسانی بر روی قابلیت اطمینان پنل سقفی اشاره شده در زمانی که پنل تحت فشار است. نتایج نشان می‌دهد که میخ‌های جا افتاده بر روی میانگین ظرفیت بالقوه پانل، تأثیرگذار است.

مرجع [۱۲] با هدف افزایش دانش پاسخ انسانی به هشدارها در زمینه موقعیت‌هایی که نیازمند دانش حرفه‌ای است، نگارش شده است. این مقاله درباره نقش انسان‌ها در شکست‌های سیستم در تنظیمات صنعتی و حفاظت بحث کرده و به بررسی واکنش آن‌ها در آزمایش طراحی شده، پرداخته است. بررسی

---

<sup>۱</sup> PSA(Probabilistic Safety Assessment)

انجام شده نشان می‌دهد که بین عکس‌العمل اپراتور به سیگنال دیداری و شنیداری تفاوت وجود دارد. نتایج نشان می‌دهد که واکنش انسان به سیگنال‌های دیداری سریع‌تر از سیگنال شنیداری است. مثال‌هایی از کارهای متفرقه که تنها وجه مشترک آن‌ها خطای انسانی است، در مرجع [۳۲] آورده شده است. در این مرجع تأثیر جایگزینی اشتباه دیسک کامپیوتر بر دسترس‌پذیری سیستم‌های ذخیره داده بررسی شده است. برای رسیدن به این هدف، شبیه‌سازی‌های مونت کارلو مورد استفاده قرار گرفته و همچنین مدل مارکوفی را پیشنهاد داده شده که نتایج شبیه‌سازی مونت کارلو را تایید می‌کند. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که چشم‌پوشی از تأثیر جایگزینی اشتباه دیسک می‌تواند نتیجه در افزایش ۳ برابری دسترس‌ناپذیری سیستم داشته باشد.

شبکه خنثی مصنوعی یک ماشین الکتریکی برای بهبود تکنیک‌های مرسوم کاربردی در آن در مرجع [۳۳] پیاده‌سازی و از مدل پارک برای تشریح کار استفاده شده است. این مرجع، خطای انسانی را دلیل به وجود آمدن خطا در رینگ مورد استفاده در ماشین، بیان کرده است. مرجع [۱۶] نشان می‌دهد که چگونه فاکتورهای انسانی، قابلیت اطمینان سیستم قدرت را از دو زمینه عمومی زیر تحت تأثیر قرار می‌دهد:

- نگهداری ناکامل که به دلیل خطای انسانی صورت گرفته.
  - تأثیر فاکتورهای انسانی بر عملکرد ضروری توزیع و شکست آبخاری سیستم قدرت.
- آنالیز تعمیر و نگهداری و قابلیت اطمینان ترانسفورماتورهای انتقال در آفریقای جنوبی در بازه ۲۰۱۴ تا ۲۰۱۶، در مرجع [۳۴] ارائه شده است. در این مقاله دلایل اصلی شکست سیستم حفاظتی، خطای انسانی و عمر بالای ترانسفورماتور قدرت بیان شده است.

### ۳-۳ | بررسی مطالعات انجام شده در زمینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی

در این بخش پژوهش‌های انجام شده در زمینه قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی و تعیین زمان بهینه تست دوره‌ای این سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد. کلمات کلیدی در این بخش به صورت زیر است:

- تست‌های دوره‌ای
- تست‌های مانیتورینگ
- تست‌های خودبازبینی
- MTTF
- بهره شکست رله‌های حفاظتی

همان‌طور که در فصل ۲ شرح داده شد، تست دوره‌ای به صورت متناوب برای افزایش دسترس پذیری سیستم حفاظتی اجرا می‌شود. زمان این تست برای افزایش دسترس‌پذیری باید بهینه شود. مرجع [۳۵] به ارزیابی قابلیت اطمینان و MTTF برای یک سیستم غیرقابل تعمیر دو حالت پیچیده (یک سیستم سخت‌افزاری تحت تأثیر خطای انسانی) پرداخته است. این سیستم شامل دو زیر سیستم است که به صورت سری مرتب شده‌اند. این مقاله برای ارزیابی پژوهش خود از یک مدل مارکوف استفاده کرده که خطای انسانی در آن مدل شده است.

مرجع [۳۶] علاوه بر تعیین MTTF به بررسی موارد زیر پرداخته است:

- ساختمان رله‌های سنتی و مدرن.
  - اهداف تست دوره‌ای و نگهداری رله‌های حفاظتی.
  - مقایسه میان تست خودبازبینی و تست منظم.
  - شکست‌هایی که به دلیل ضعف در قابلیت اتکا سیستم حفاظتی به وجود آمده‌اند.
- این پژوهش هدف خود را با ارائه یک مدل مارکوف پیش برده است. این مدل بازه زمانی بهینه تست دوره‌ای برای رله‌های حفاظتی در دو حالت کاربرد و عدم کاربرد تست خودبازبینی پیش‌بینی می‌کند. مدل احتمالاتی نشان می‌دهد که بازه زمانی بهینه تست برای رله با وجود تست‌های خودبازبینی، بسیار طولانی است.
- تخمین بازه زمانی بهینه تست دوره‌ای و بدست آوردن شاخص‌های قابلیت اطمینان برای چندین ساختار رله اضافه جریان هدف مرجع [۳۷] است. یک مدل مارکوف برای سیستمی که بازرسی شده

تعریف شده تا دسترس ناپذیری غیرعادی و بازه زمانی بهینه تست دوره‌ای را ارزیابی کند. این مرجع بازه زمانی بهینه تست دوره‌ای را بدست آورده است. حساسیت و دسترس ناپذیری این سیستم به وسیله نمودار نشان داده شده است. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که این روش بین چندین ساختار طرح رله اضافه جریان تمایز قائل می‌شود. به علاوه دسترس ناپذیری غیرعادی و بازه زمانی بهینه تست به صورت مستقیم به چندین پارامتر همانند نرخ شکست، نرخ تعمیر و ضریب اثربخشی تست خودبازبینی وابسته است.

مرجع [۳۸] اهداف زیر را دنبال می‌کند:

- تعیین بازه زمانی بهینه تست دوره‌ای.
  - مقایسه شاخص دسترس ناپذیری غیرعادی چندین ساختار طرح‌های حفاظتی آزمایشی با استفاده از مدل مارکوف و روش درخت وقایع.
- نتایج نشان دهنده این است که روش پیشنهاد شده نه تنها می‌تواند تفاوت انواع گوناگون طرح حفاظتی راهبردی را از جنبه قابلیت اطمینان تشخیص دهد، بلکه می‌تواند برای تخمین بازه زمانی بهینه تست دوره‌ای مناسب برای هر طرح حفاظتی استفاده شود.

در مرجع [۳۹] یک مدل مارکوف برای تعیین زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی خط انتقال پیشنهاد شده است. این مدل امکان انجام تست‌های خودبازبینی و مانیتورینگ را برای رله‌های حفاظتی در نظر گرفته است. در این مقاله رله‌های پشتیبان صد در صد قابلیت اطمینان است. مرجع [۴۰] مدل مارکوف پیشنهادی [۴۱] را برای سیستم حفاظتی ترانسفورماتورهای قدرت به کار گرفته است. هدف پژوهش تعیین زمان بهینه تست دوره‌ای این سیستم بوده است. مرجع [۴۱] نیز مدل پیشنهاد شده [۳۹] را برای طرح رله اضافه جریان مستقیم اصلاح کرده تا بازه زمانی بهینه تست دوره‌ای را تخمین بزند. در مدل اصلاح شده موارد زیر بررسی شده است:

- به حساب آوردن تأثیرات اجزاء حفاظتی خاص.
- آنالیز حساسیت برای بررسی تأثیر بهره خطای اجزاء متفاوت حفاظتی بر روی قابلیت اطمینان

سیستم حفاظتی.

• اعمال ملاحظات افزونگی در بخش‌های متفاوت سیستم با استفاده از مدل توسعه یافته. تحقیق‌ها برای شناسایی بخش‌های ضعیف سیستم، صورت گرفته است. پیشنهادهای ارائه شده، به طراحان و برنامه‌ریزهای سیستم حفاظتی کمک می‌کند تا از سیستم‌های ساختار افزونه با در نظر گرفتن هزینه حالت مؤثر استفاده بهینه نمایند.

یک مدل مارکوف در مرجع [۴۲] برای آنالیز قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی پیشنهاد شده است. در این مدل رله پشتیبان کاملاً قابل اطمینان نیست. در مدل مارکوف پیشنهادی، فرض شده است که سیستم حفاظتی تنها مجهز به تست خودبازبینی است. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که اگر رله پشتیبان به صورت کامل قابل اطمینان نباشد، بازه زمانی بهینه تست دوره‌ای و شاخص‌های مطلوب قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی کاهش می‌یابد. همچنین بازه زمانی تست دوره‌ای و  $MTTF$ ، با افزایش اثربخشی تست خودبازبینی افزایش می‌یابد.

مرجع [۴۳] رویکرد جدیدی را برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های حفاظتی با به حساب آوردن قابلیت اطمینان اجزاء آن ارائه داده است. در این مقاله برنامه تست دوره‌ای مرسوم برای بدست آوردن بازه زمانی اجرای تست دوره‌ای هر جزء حفاظتی (به عنوان یک واحد مجزاء) پیشنهاد داده شده است. این مقاله برنامه فوق برای رسیدن به اهداف زیر پیشنهاد داده است:

• پیشینه کردن دسترس‌پذیری سیستم حفاظتی.

• جلوگیری از هزینه اضافی غیر لازم.

در این مرجع مدل گسترش داده شده مرجع [۴۱] برای ارزیابی تأثیر اجزاء حفاظتی منحصر به فرد استفاده شده است. در مدل مورد استفاده، تست‌های دوره‌ای، مانیتورینگ، خودبازبینی و خطای انسانی، شبیه‌سازی و آنالیز شده است. مقایسه صورت گرفته نشان می‌دهد که رویکرد پیشنهاد شده دارای برتری بر تست دوره‌ای مرسوم است.

مرجع [۴۴] یک مدل مارکوف گسترش یافته را برای آنالیز قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی

پیشنهاد داده است. در این مدل فرض شده است که رله پشتیبان و رله اصلی کاملاً قابل اطمینان نمی‌باشند. در این مدلسازی تست خودبازبینی و مانیتورینگ در سیستم حفاظتی پیشنهاد داده شده است. این مرجع همانند [۴۲] عمل کرده ولی نقطه متفاوت آن اضافه کردن تست مانیتورینگ به مدل است. نتایج بدست آمده از این پژوهش به شرح زیر است:

- با افزایش ضریب اثربخشی تست‌های خودبازبینی و مانیتورینگ سیستم حفاظتی پشتیبان، بازه‌ی زمانی بهینه تست‌های خودبازبینی و دوره‌ای سیستم به صورت مؤثری افزایش می‌یابد.
- با افزایش ضریب اثربخشی تست خودبازبینی رله پشتیبان، بازه زمانی بهینه تست خودبازبینی کاهش می‌یابد.

قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی از نقطه نظر اقتصادی در [۴۵] بررسی شده است. این مقاله روشی را پیشنهاد می‌کند که طراح را برای انتخاب بهینه اجزاء نرم‌افزاری و سخت‌افزاری رله حفاظتی دیجیتال یاری می‌نماید. هدف از روش فوق، بهره گرفتن از بیشترین قابلیت اطمینان ممکن با توجه به بودجه محدود است. نتایج نشان‌دهنده کاربردی بودن روش ارائه شده است. همچنین نتایج نشان می‌دهد که با بودجه محدود در ابتدا باید کمترین قابلیت اطمینان ممکن برای تقویت سیستم برآورده شده باشد و گزینه‌های گران‌تر باید برای رسیدن به بالاترین قابلیت اطمینان ممکن، انتخاب شوند.

یک مدل مارکوف برای تخمین بازه زمانی بهینه تست دوره‌ای و تست خودبازبینی در [۴۶] گسترش داده شده است. در مدل فوق احتمال شکست برای سیستم پشتیبان وجود دارد. در این مرجع تأثیر ضریب اثربخشی تست خودبازبینی سیستم حفاظتی پشتیبان بر روی بازه زمانی بهینه تست خودبازبینی تخمین زده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد، در زمانی که سیستم حفاظتی پشتیبان صورت کامل قابل اطمینان نیست، تغییرات قابل توجهی در شاخص‌های قابلیت اطمینان، بازه زمانی بهینه تست دوره‌ای و خودبازبینی برای سیستم حفاظتی یک سیستم قدرت، قابل مشاهده است. به طور مشخص نتایج اصلی این مرجع را می‌توان به صورت زیر بیان کرد.

- با افزایش ضرایب اثربخشی تست‌های خودبازبینی و مانیتورینگ، بازه زمانی بهینه تست دوره‌ای

سیستم حفاظتی افزایش می‌یابد.

• برای تخمین دقیق‌تر بازه زمانی بهینه تست دوره‌ای و خودبازبینی، در نظر گرفتن احتمال

شکست برای سیستم حفاظتی پشتیبان لازم است.

مرجع [۴۷] به بازبینی مقالات مختلف در زمینه مدل کردن قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی

پرداخته است. مرجع فوق درباره‌ی مشکلات و چالش‌های ترکیب کردن سیستم‌های حفاظتی برای

ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم قدرت ترکیبی، بحث کرده است.

مرجع [۴۸] با هدف ارائه رویکرد ترکیبی، تحلیلی و شبیه‌سازی برای ارزیابی بهره‌های انتقال

مدل‌های قابلیت اطمینان رله، به وسیله داده غیرکامل نگارش شده است. مرجع فوق همچنین موضوع

تخمین قابلیت اطمینان رله‌های حفاظتی را که در محیط آلوده به هارمونیک عمل می‌کنند را بررسی

می‌کند. این پژوهش راه حلی را برای محاسبه ماتریس بهره انتقال زنجیره مارکوف، برای مدل رله

دیستانس دیجیتال ساده شده، ارائه می‌دهد.

مرجع [۴۹] بازه‌های زمانی بهینه را برای تست‌های خودبازبینی و دوره‌ای یک شبکه بدست آورده

است. هدف مرجع فوق، اطمینان از مشاهده‌پذیری بیشینه آن شبکه است. این مرجع همچنین یک

الگوریتم برنامه‌ریزی تعمیر و نگهداری هوشمند پیشنهاد داده که نتایج آن به شرح زیر هستند:

• تست خودی با کارایی بالاتر نیازمند تعمیر و نگهداری منظم کمتر است.

• تست‌های مانیتورینگ و خودبازبینی به کار رفته برای پیش‌بینی شرایط سنسور در حال کار،

برای دو مورد کمک کننده است:

۱. به هنگام تعمیر و نگهداری فازی.

۲. برای برنامه تعمیر و نگهداری واقع‌بینانه.

مرجع [۵۰] بر لزوم انجام تعمیر و نگهداری رله‌های حفاظتی و اتوماسیون و میزان آن تمرکز کرده

است. این مرجع همچنین مقالات چاپ شده در این موضوع را، بررسی کرده است.



مرجع [۵۱] یک شبکه جریان تصادفی<sup>۱</sup> را برای مدل کردن سیستم حفاظتی جریان محدود پیشنهاد داده است. این مرجع همچنین روشی را برای ایجاد بهبودی جامع در سیستم حفاظتی معرفی می کند. مدل پیشنهاد شده بر روی موارد زیر تمرکز دارد:

- حالت چندگانه ظرفیت‌های مقید شده عبوری از اجزاء بحرانی.
- جریان مورد تقاضا در رله‌های حفاظتی.

### ۴-۳ | خلاصه پژوهش‌های انجام شده

پژوهش‌هایی که در بخش پیشین آورده شده بود، به صورت خلاصه در جدول (۱-۳) آورده شده است.

جدول (۱-۳) پژوهش‌های بررسی شده در یک نگاه

شماره مرجع	موضوع بررسی شده	هدف اصلی	تجهیزات و یا محل مورد بررسی
[۱۰]	خطای انسانی	پیشنهاد مدل‌های ریاضی از خطای مشاهده شده که برای آنالیز قابلیت اطمینان انسانی مناسب است	مهندسی
[۱۱]	خطای انسانی	طبقه‌بندی کامل خطای انسانی	مهندسی
[۱۲]	خطای انسانی	افزایش دانش پاسخ انسانی به هشدارها در زمینه موقعیت‌هایی که نیازمند دانش حرفه‌ای هستند.	صنعت
[۱۳]	خطای انسانی	شناسایی و خاصیت‌سنجی خطای انسانی	فلسفه، جامعه شناسی و روانشناسی
[۱۴]	خطای انسانی	ارزیابی ایمنی احتمالی در آنالیز قابلیت اطمینان انسانی	مهندسی انرژی (قدرت)
[۱۶]	خطای انسانی	چگونگی تحت تأثیر قرار گرفتن قابلیت اطمینان سیستم قدرت توسط فاکتورهای انسانی	سیستم قدرت

<sup>1</sup> Stochastic-flow network (SFN)

ادامه جدول (۳-۱)

شیر ایزولاسیون نیروگاه هسته‌ای	شبیه‌سازی یک برنامه آزمایشی برای بدست آوردن فرمول دسترس‌ناپذیری چندین ساختار رایج	خطای انسانی	[۲۳]
نیروگاه هسته‌ای	ارزیابی امنیت نیروگاه از طریق بررسی تأثیرات دو نوع خطای انسانی برای تخمین زمان بهینه میان بازرسی‌ها	خطای انسانی	[۲۴]
نیروگاه هسته‌ای	آنالیز خطای انسانی در دو برنامه آزمایشی	خطای انسانی	[۲۵]
سیستم‌های اضافی	مدلسازی برای ارزیابی قابلیت اطمینان	خطای انسانی	[۲۷]
سیستم قدرت	ارائه مدل مفهومی برای وظایف تعمیر و نگهداری	خطای انسانی	[۲۸]
قایق نجات	جمع‌آوری اطلاعات	خطای انسانی	[۳۰]
موسسه خدماتی	آمارگیری از یک نظرسنجی پیرامون تجهیزات یک موسسه تحقیقاتی	خطای انسانی	[۳۱]
کامپیوتر	بررسی تأثیر جایگزینی اشتباه دیسک کامپیوتر بر دسترس‌پذیری سیستم‌های ذخیره داده	خطای انسانی	[۳۲]
ماشین‌های الکتریکی	پیاده‌سازی شبکه خنثی مصنوعی یک ماشین الکتریکی برای بهبود تکنیک‌های مرسوم کاربردی در آن	خطای انسانی	[۳۳]
ترانسفورماتور قدرت	آنالیز تعمیر و نگهداری و قابلیت اطمینان ترانسفورماتورهای انتقال در آفریقای جنوبی	خطای انسانی	[۳۴]
سیستم سخت افزاری	ارائه مدل مارکوف برای ارزیابی قابلیت اطمینان و تعیین تست دوره‌ای	قابلیت اطمینان	[۳۵]
رله حفاظت	ارائه یک مدل مارکوف به جهت تعیین بازه زمانی بهینه تست دوره‌ای	قابلیت اطمینان	[۳۶]
رله حفاظت اضافه جریان	تخمین بازه زمانی بهینه تست دوره‌ای و بدست آوردن شاخص‌های قابلیت اطمینان	قابلیت اطمینان	[۳۷]
طرح حفاظت آزمایشی	مدلسازی برای بدست آوردن زمان بهینه تست دوره‌ای و مقایسه شاخص دسترس‌ناپذیری غیرعادی چندین ساختار	قابلیت اطمینان	[۳۸]
سیستم حفاظتی خط انتقال	ارائه مدل مارکوف برای تعیین زمان بهینه تست دوره‌ای با در نظر گرفتن امکان انجام تست‌های خودبازبینی و مانیتورینگ	قابلیت اطمینان	[۳۹]
سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت	ارائه یک مدل مارکوف برای تعیین زمان بهینه تست دوره‌ای با در نظر گرفتن امکان انجام تست‌های خودبازبینی و مانیتورینگ	قابلیت اطمینان	[۴۰]
رله اضافه جریان	ارائه مدل مارکوف برای طرح رله اضافه جریان مستقیم برای تخمین بازه بهینه تست دوره‌ای، آنالیز حساسیت و بررسی ملاحظات افزونگی در بخش‌های مختلف سیستم	قابلیت اطمینان	[۴۱]
سیستم حفاظتی	ارائه رویکردی جدید، برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم‌های حفاظتی با به حساب آوردن قابلیت اطمینان اجزاء آن	قابلیت اطمینان	[۴۳]
سیستم حفاظتی	پیشنهاد یک مدل مارکوف گسترش یافته شده برای آنالیز قابلیت اطمینان با فرض این که رله پشتیبان همانند رله اصلی کاملاً قابل اطمینان نمی‌باشد با در نظر گرفتن تست خودبازبینی و مانیتورینگ	قابلیت اطمینان	[۴۴]

ادامه جدول (۱-۳)

سیستم حفاظتی	بررسی قابلیت اطمینان از نقطه دید اقتصادی	قابلیت اطمینان	[۴۵]
سیستم حفاظتی	ارائه یک مدل مارکوف گسترش داده شده برای تخمین بازه زمانی بهینه تست دوره‌ای و تست خودبازبینی با در نظر گرفتن احتمال شکست سیستم پشتیبان	قابلیت اطمینان	[۴۶]
سیستم حفاظتی	بازبینی مقالات درباره مدل کردن قابلیت اطمینان یک سیستم	قابلیت اطمینان	[۴۷]
رله‌های حفاظتی	ارائه رویکرد ترکیبی، تحلیلی و شبیه‌سازی برای ارزیابی بهره‌های انتقال مدل‌های قابلیت اطمینان، به وسیله داده غیرکامل و تخمین قابلیت اطمینان در محیط آلوده به هارمونیک	قابلیت اطمینان	[۴۸]
شبکه قدرت	پیشنهاد و بررسی بازه‌های زمانی بهینه برای تست‌های خودبازبینی و دوره‌ای یک شبکه، به منظور اطمینان از مشاهده‌پذیری بیشینه آن	قابلیت اطمینان	[۴۹]
رله‌های حفاظتی	تمرکز بر روی لزوم و مقدار تعمیر و نگهداری رله‌های حفاظتی و اتوماسیون	قابلیت اطمینان	[۵۰]
جریان محدود	مدل کردن یک شبکه جریان تصادفی برای سیستم حفاظتی	قابلیت اطمینان	[۵۱]

۳-۵ | جمع‌بندی

مطابق آنچه در بخش‌های قبل بیان شده است، در مراجع [۲۲]، [۲۳]، [۲۵]، [۲۶]، [۲۸]، [۱۳]، [۳۰]، [۱۶] و [۳۲]، قابلیت اطمینان سیستم مورد بحث، مدلسازی شده است. مرجع [۲۱] از طریق شبیه‌سازی، خطای انسانی را بررسی کرده است. نوع خاصی از خطای انسانی در مرجع [۱۷] از طریق معرفی یک روش، آنالیز شده است. مراجع [۲۹]، [۱۴]، [۱۲] و [۱۰] خطای انسانی را به ترتیب از طریق جمع‌آوری اطلاعات، طبقه‌بندی، شناسایی، خاصیت‌سنجی و آمارگیری بررسی کرده‌اند و مرجع [۱۲] پاسخ‌های انسانی به هشدارها را توصیف و دسته‌بندی کرده است.

در بخش دوم آنالیز قابلیت اطمینان و تست‌های دوره‌ای ارائه شده است. مراجع [۳۳] تا [۴۲]، [۴۴]، [۴۶]، [۴۷]، [۴۹] هدف خود را از شیوه مدلسازی را برآورده کرده‌اند. در این مراجع، ابزار خودبازبینی و مانیتورینگ با توجه به هدف و سیستم مورد بررسی، مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین رله‌های اصلی و یا پشتیبان نیز، بسته به هدف مورد نظر می‌توانند دارای احتمال خرابی باشند. ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی و بدست آوردن زمان بهینه تست دوره‌ای از جمله مواردی است که تقریباً

تمام مراجع فوق آن را بررسی کرده‌اند. مرجع [۴۳] دید اقتصادی به موضوع قابلیت اطمینان داشته، مرجع [۴۵] به بررسی مقالات ارائه شده پیرامون این موضوع پرداخته و مرجع [۴۸] سیستم قدرت را از نقطه نظر تعمیر و نگهداری آنالیز کرده است.

پژوهش‌های انجام شده پیرامون خطای انسانی که در این بخش بررسی شد، نشان‌دهنده نوع نگرش به بحث خطای انسانی و قابلیت اطمینان بوده است. نگرش نوینی که این پایان نامه بر اساس آن انجام گرفته است، به شرح زیر است:

- مدل کردن خطای انسانی در یک مدل مارکوف.
- بدست آوردن نرخ شکست رله حفاظتی از این مدل.
- استفاده از این نرخ برای تعیین زمان بهینه تست دوره‌ای و شاخص‌های قابلیت اطمینان.
- تأثیر خطای انسانی بر روی زمان بهینه تست دوره‌ای و شاخص‌های قابلیت اطمینان.



## فصل چهارم

مدلسازی تأثیر خطای انسانی بر روی نرخ خرابی  
سیستم حفاظتی و زمان بهینه تست دوره‌ای آن

## ۴-۱ | مقدمه

هدف از این فصل، تعیین میزان تأثیر خطای انسانی بر روی نرخ خرابی سیستم حفاظتی و بازه زمان بهینه تست دوره‌ای آن، با استفاده از روش مارکوف است. در ابتدا یک مدل مارکوف برای محاسبه نرخ خرابی سیستم حفاظتی، با توجه به نرخ خطای انسانی ارائه شده است. در مدل مارکوف پیشنهادی، فرض شده است که رله‌ها تعمیرپذیر هستند. تعداد رله‌های به کار گرفته شده وابسته به عنصر تحت حفاظت می‌باشد. مدل مارکوف پیشنهادی برای سیستم حفاظتی خط انتقال و ترانسفورماتور قدرت پیاده‌سازی شده است. همچنین فرض شده است که سیستم حفاظت خط انتقال دارای دو رله دیستانس<sup>۱</sup> و اضافه جریان<sup>۲</sup> می‌باشد، و ترانسفورماتور قدرت به کمک رله‌های اضافه جریان، خطای زمین<sup>۳</sup>، خطای زمین محدود شده<sup>۴</sup> و دیفرانسیل<sup>۵</sup> حفاظت می‌شود. به منظور تعیین بازه زمانی بهینه تست دوره‌ای از مدل مارکوف سیستم حفاظتی و عنصر تحت حفاظت که در مرجع [۳۶] ارائه شده است، استفاده شده است.

## ۴-۲ | تأثیر خطای انسانی بر روی زمان بهینه تست دوره‌ای

برای بررسی تأثیر خطای انسانی بر روی زمان بهینه تست دوره‌ای رله‌های حفاظتی، از مدل مارکوف تجمیع شده سیستم حفاظتی [۳۹] و مدل مارکوف گسترده شده سیستم حفاظتی و عنصر تحت حفاظت [۳۶] استفاده می‌شود.

## ۴-۲-۱ | مدل تجمیع شده سیستم حفاظتی

مدل مارکوف تجمیع شده در شکل (۴-۱) و تعریف هر یک از حالت‌های این مدل در جدول (۴-۲)، آورده شده است. حالت اول موقعیتی را توصیف می‌کند که بیان‌گر سالم بودن سیستم حفاظتی و عدم

---

<sup>1</sup> Distance

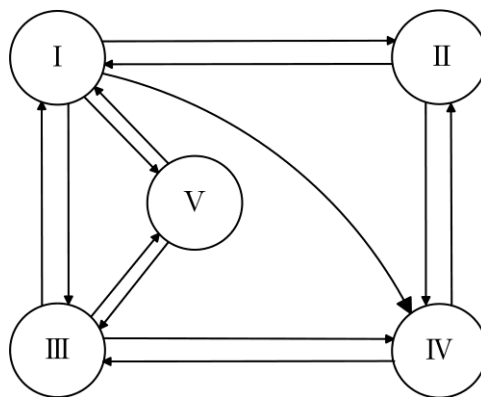
<sup>2</sup> Over Current

<sup>3</sup> Earth Fault

<sup>4</sup> Restricted Earth Fault

<sup>5</sup> Differencial

وقوع خطا بر روی عنصر تحت حفاظت است. این حالت بیانگر دسترس پذیری سیستم است. حالت دوم بیان می‌کند که اگر خطا روی عنصر تحت حفاظت به وقوع بپیوندد، سیستم حفاظتی قادر به عمل کردن می‌باشد و نشان‌دهنده قابلیت اتکای سیستم حفاظتی است. حالت سوم مربوط به دسترس ناپذیری سیستم حفاظتی می‌باشد. در این حالت سیستم حفاظتی قادر به انجام فعالیت مربوط به خود بنابر دلایلی چون انجام تست دوره‌ای و یا بازرسی‌های مربوط به تست خودبازبینی، نیست. حالت چهارم دسترس ناپذیری غیرعادی را توصیف می‌کند. این موقعیت زمانی ایجاد می‌شود که سیستم حفاظتی توانایی اجرای وظایفی که برای آن برنامه‌ریزی شده است را ندارد. حالت آخر بیانگر موقعیتی است که به علت ضعف امنیتی سیستم حفاظتی به وجود می‌آید. شاخص امنیت بیانگر احتمال عملکرد سیستم حفاظتی است در زمانی که نیاز به عملکرد آن نمی‌باشد. زمان بهینه تست دوره‌ای، زمانی است که شاخص‌های مطلوب قابلیت اطمینان یعنی شاخص‌های دسترس‌پذیری و قابلیت اتکا حداکثر و شاخص‌های نامطلوب قابلیت اطمینان یعنی شاخص‌های دسترس‌ناپذیری، دسترس ناپذیری غیرعادی و امنیت حداقل گردند. برای محاسبه نقطه بهینه از روش یک یک شماری استفاده شده است.



شکل (۱-۴) مدل مارکوف تجمیع شده [۳۹]

جدول (۱-۴) حالت‌های مدل مارکوف تجمیع شده [۳۹]

توصیف موقعیت	شماره حالت
عدم وقوع خطا روی عنصر تحت حفاظت و سالم بودن رله	حالت اول
وقوع خطا روی عنصر تحت حفاظت و سالم بودن رله	حالت دوم
عدم وقوع خطا روی عنصر تحت حفاظت و سالم نبودن رله	حالت سوم
وقوع خطا روی عنصر تحت حفاظت و سالم نبودن رله	حالت چهارم
عدم وقوع خطا روی عنصر تحت حفاظت و عملکرد رله	حالت پنجم



#### ۴-۲-۲ | مدل مارکوف گسترده سیستم حفاظتی و عنصر تحت حفاظت

زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی، با توجه به مدل مارکوف پیشنهادی در مرجع [۳۶] که در شکل (۲-۴) ارائه شده، تعیین می‌شود. این مدل دارای نه حالت است که هر حالت در یکی از پنج حالت مدل مارکوف تجمیع شده قرار می‌گیرد. احتمال هر یک از حالت‌های مدل تجمیع شده با توجه به مدل گسترده به کمک رابطه (۱-۴) محاسبه می‌شود. مجموع احتمالات حالت‌های رابطه (۱-۴) برابر ۱ است.

$$\begin{aligned} P_I &= p_1 \\ P_{II} &= p_2 + p_6 \\ P_{III} &= p_3 + p_5 + p_9 \\ P_{IV} &= p_4 + p_8 \\ P_V &= p_7 \end{aligned} \quad (1-4)$$

لازم به ذکر است که زمان بهینه تست دوره‌ای با حداکثر کردن شاخص‌های قابلیت اطمینان مطلوب یعنی احتمال‌های  $P_I$  و  $P_{II}$  و یا حداقل نمودن شاخص‌های قابلیت اطمینان نامطلوب یعنی  $P_{III}$ ،  $P_{IV}$  و  $P_V$  بدست می‌آیند. احتمال هر یک از حالت‌های مدل گسترده به کمک روابط (۱۰-۴) الی (۱۲-۴) بدست می‌آید. ماتریس  $\mathbf{p}$ ، ماتریس بردار شامل احتمال حالت‌های مدل مارکوف سیستم حفاظتی و  $\mathbf{T}$ ، ماتریس گذرایی مدل قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی است.

$$\mathbf{p} = [p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8, p_9] \quad (2-4)$$

$$\mathbf{pT} = \mathbf{p} \quad (3-4)$$

$$\sum_{i=1}^9 p_i = 1 \quad (4-4)$$

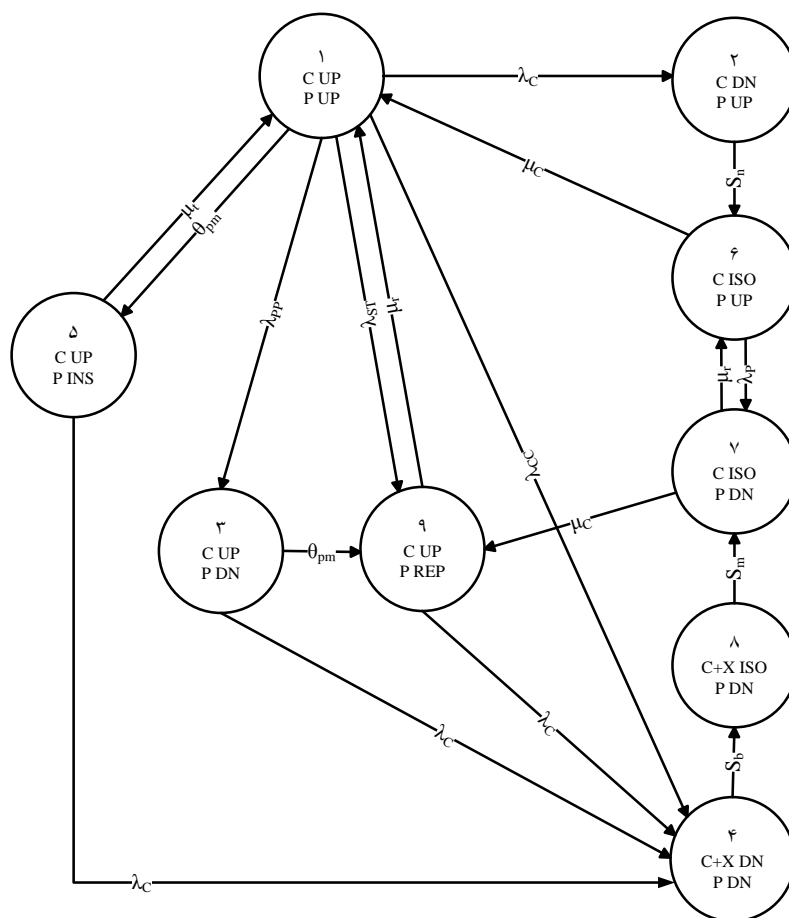
در ادامه به بررسی مختصری از هر یک حالت‌های مدل مارکوف پرداخته می‌شود.

حالت ۱ نشان دهنده شرایطی است که در آن عنصر تحت حفاظت است و رله نیز به صورت مناسب عمل می‌کند. هنگام وقوع خطای عنصر تحت حفاظت به حالت غیرفعال یعنی حالت ۲ انتقال می‌یابد.

در حالت ۲، عنصر تحت حفاظت با خطا مواجه شده ولی رله به صورت مناسب عمل می‌کند و سیگنال‌های قطع را برای مدار شکن می‌فرستد و سیستم مدل را به حالت ۶ که عنصر تحت حفاظت ایزوله می‌شود، انتقال می‌یابد.

حالت‌های ۳، ۵ و ۹ شرایطی را نشان می‌دهد که رله خارج از سرویس است و نمی‌تواند به هنگام وقوع خطا عمل کند. در حالت ۵ رله به دلیل بازرسی خارج از سرویس است. در حالت ۳ رله به سبب خرابی رله خارج از سرویس است. حالت ۹ موقعیتی را نشان می‌دهد که رله تحت عمل تعمیر است. مدل زمانی از حالت ۱ به حالت ۹ وارد می‌شود. که خرابی رله به وسیله تست خودبازبینی شناسایی شده باشد. مدل زمانی از حالت ۳ به حالت ۹ می‌رود که شکست رله به وسیله تست تعمیر و نگهداری دوره‌ای شناسایی شود. همچنین اگر خرابی رله به وسیله تست خودبازبینی رله قابل شناسایی نباشد، مدل از حالت ۱ به حالت ۳ می‌رود.

مدل زمانی وارد حالت ۴ می‌شود که رله خارج از سرویس باشد و یا خرابی با دلایل رایج رله در سیستم مشاهده شود. در مدل فرض شده است که اگر در حالی که رله خارج از سرویس است خطایی مشاهده شود، سیستم حفاظت پشتیبان باید برای ایزوله کردن خطا عمل کند. زمانی که سیستم حفاظت پشتیبان عمل می‌کند بخش بزرگتری از سیستم قدرت نسبت به بخشی که با عملکرد رله اصلی خارج می‌شود، خارج از سرویس قرار می‌گیرد. این توضیحات در حالت‌های ۴ و ۸ با ایزوله کردن عناصر C و X دیده می‌شود. X بیانگر تجهیزات اضافی است که به وسیله عملکرد رله پشتیبان خارج از سرویس قرار گرفته است. نرخ بازدید رله،  $\theta_{PM}$  به کمک رابطه (۴-۵) تعریف می‌شود، که در این رابطه RTTI زمان بهینه تست دوره‌ای است. همچنین نرخ  $\lambda_{ST}$  بیانگر خرابی‌هایی از رله است که به وسیله تست خودبازبینی شناسایی می‌شود و  $\lambda_{PP}$  خرابی‌هایی از رله است که به وسیله تست خودبازبینی شناسایی نمی‌شود، این دو پارامتر به ترتیب به کمک روابط (۴-۶) و (۴-۷) مشخص می‌شوند. در این روابط SE ضریب اثربخشی تست خودبازبینی است.



شکل (۲-۴) مدل مارکوف گسترده شده سیستم حفاظتی و عنصر تحت حفاظت [۳۶]

$$\theta_{PM} = \frac{1}{RTTI} \quad (۵-۴)$$

$$\lambda_{st} = \lambda_p \times (SE) \quad (۶-۴)$$

$$\lambda_{pp} = \lambda_p \times (1 - SE) \quad (۷-۴)$$

### ۳-۴ | مدل مارکوف پیشنهادی برای تعیین نرخ خرابی سیستم حفاظتی خط انتقال

برای ارائه مدل مارکوف سیستم حفاظتی خط انتقال، فرض شده است که خط انتقال توسط رله‌های دیستانس و اضافه جریان حفاظت می‌شود. این دو رله از دیدگاه قابلیت اطمینان به صورت موازی به هم متصل می‌شوند و به این معنا است که با از کار افتادن یکی از رله‌ها سیستم حفاظتی دچار شکست نخواهد شد. شکل (۳-۴) مدل مارکوف را برای تعیین تأثیر نرخ خطای انسانی بر روی نرخ خرابی سیستم

حفاظتی خط انتقال نشان می‌دهد. فرضیات زیر برای مدل مارکوف پیشنهادی در نظر گرفته شده است:

۱. شکست سیستم به دلیل خطای انسانی، از شکست سیستم به دلیل سایر عوامل، جدا در نظر گرفته می‌شود.

۲. هر مرتبه که سیستم با شکستی که دلیل آن غیر از خطای انسانی است، مواجه شود، تنها یکی از رله‌ها خراب می‌شود.

۳. نرخ‌های خرابی، تعمیر و خطای انسانی مقادیر ثابتی دارند.

۴. شکست‌های سیستم نسبت به هم از لحاظ آماری غیر وابسته می‌باشند.

۵. خطای انسانی یک خطای بحرانی است، یعنی باعث شکست کامل سیستم حفاظتی می‌شود.

مطابق شکل (۳-۴)، مدل مارکوف پیشنهادی دارای ۵ حالت است. در حالت اول هر دو رله حفاظتی

سالم هستند و سیستم در دسترس است. با وقوع خطای انسانی، مدل مارکوف با نرخ خرابی  $\lambda_{H2}$  به

حالت ۴ وارد می‌شود. این حالت به معنای شکست کامل سیستم حفاظتی است. با خرابی رله دیستانس

مدل از حالت ۱، با نرخ خرابی  $\lambda_{DIS}$  به حالت ۲ می‌رود و همچنین با خرابی رله اضافه جریان، مدل از

حالت ۱ با نرخ خرابی  $\lambda_{OC}$  به حالت ۳ خواهد رفت. در این دو حالت اگر رله معیوب تعمیر شود، مدل با

نرخ مخصوص به خود به حالت اول باز می‌گردد. به عنوان مثال با تعمیر رله دیستانس در حالت ۲، مدل

از حالت ۲ با نرخ  $\lambda_{DIS}$  به حالت ۱ برمی‌گردد. اگر در هر یک از این دو حالت، رله سالم دچار خرابی

شود، سیستم حفاظتی شکست می‌خورد و مدل به حالت ۵ می‌رود. اگر رله‌ها در این حالت تعمیر شوند

رله از حالت ۵ با نرخ  $\mu_{tt}$  به حالت ۱ بر می‌گردد. با وجود خطای انسانی مدل از حالت‌های ۲ و ۳، با نرخ

خرابی  $\mu_{H1}$  به حالت ۴ وارد می‌شود. سیستم با نرخ تعمیر  $\mu_{H}$  از حالت ۴ به حالت ۱ باز می‌گردد.

برای تعیین نرخ خرابی سیستم حفاظتی، ابتدا باید MTTF این سیستم تعیین شود. روند محاسبه این

نرخ مطابق روابط (۴-۸) الی (۴-۱۰)، است. ماتریس گذرای مدل مارکوف سیستم حفاظتی خط انتقال

در رابطه (۴-۱۱) آورده شده است. همان‌طور که از رابطه (۴-۱۱) مشخص است مجموع درایه‌های هر

سطر برابر یک است، که شرط ماتریس گذرای مدل مارکوف است. توجه شود که ماتریس  $Q$  با حذف

سطرها و ستون‌های مربوط به حالت‌های ماندگار ماتریس گذرایی  $\mathbf{M}$  (حالت‌های مربوط به شکست کامل سیستم حفاظتی) بدست می‌آید و ماتریس  $\mathbf{I}$ ، ماتریس همانی است.

$$\mathbf{W} = [\mathbf{I} - \mathbf{Q}]^{-1} \quad (۸-۴)$$

$$\text{MTTF} = W_{(1,1)} + W_{(1,2)} + W_{(1,3)} \quad (۹-۴)$$

$$\lambda_p = \frac{1}{\text{MTTF}} \quad (۱۰-۴)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} A_1 & \lambda_{DIS} & \lambda_{OC} & \lambda_{H2} & 0 \\ \mu_{DIS} & A_2 & 0 & \lambda_{H1} & \lambda_{OC} \\ \mu_{OC} & 0 & A_3 & \lambda_{H1} & \lambda_{DIS} \\ \mu_H & 0 & 0 & A_4 & 0 \\ \mu_t & \mu_{OC} & \mu_{DIS} & 0 & A_5 \end{bmatrix} \quad (۱۱-۴)$$

$$A_1 = 1 - \lambda_{DIS} - \lambda_{OC} - \lambda_{H2}$$

$$A_2 = 1 - \mu_{DIS} - \lambda_{OC} - \lambda_{H1}$$

$$A_3 = 1 - \mu_{OC} - \lambda_{DIS} - \lambda_{H1}$$

$$A_4 = 1 - \mu_H$$

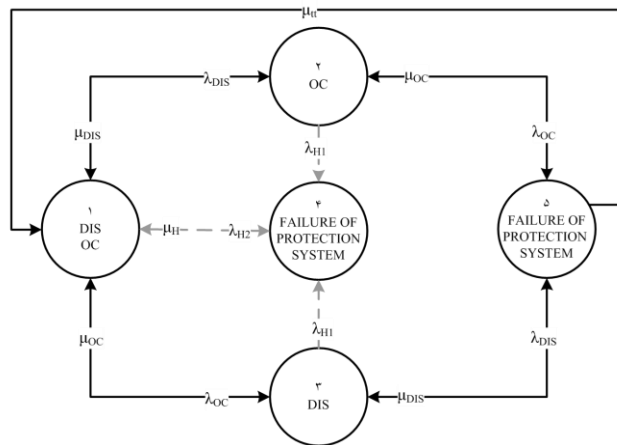
$$A_5 = 1 - \mu_t - \mu_{OC} - \mu_{DIS}$$

ماتریس  $\mathbf{Q}$  سیستم حفاظتی خط انتقال، از حذف سطر و ستون مربوط به حالت‌های ۴ و ۵ ماتریس  $\mathbf{M}$  بدست می‌آید.

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} A_1 & \lambda_{DIS} & \lambda_{OC} \\ \mu_{DIS} & A_2 & 0 \\ \mu_{OC} & 0 & A_3 \end{bmatrix} \quad (۱۲-۴)$$

با انجام محاسبات فوق،  $\text{MTTF}$  سیستم حفاظتی خط انتقال با در نظر گرفتن نرخ خطای انسانی به

کمک رابطه (۱۳-۴) محاسبه می‌شود.



شکل (۳-۴) مدل مارکوف برای تعیین نرخ خرابی سیستم حفاظتی خط انتقال با در نظر گرفتن خطای انسانی

$$MTTF = \frac{A}{B} \quad (۱۳-۴)$$

$$A = (\lambda_{OC} + \lambda_{H2} + \mu_{DIS}) \times (\lambda_{DIS} + \lambda_{H2} + \mu_{OC}) + \lambda_{OC} \times (\lambda_{OC} + \lambda_{H2} + \mu_{DIS}) + \lambda_{DIS} \times (\lambda_{DIS} + \lambda_{H2} + \mu_{OC})$$

$$B = \lambda_{OC} \times \lambda_{DIS}^2 + \lambda_{OC}^2 \times \lambda_{DIS} + \lambda_{OC} \times \lambda_{H2}^2 + \lambda_{OC}^2 \times \lambda_{H2} + \lambda_{DIS} \times \lambda_{H2}^2 + \lambda_{DIS}^2 \times \lambda_{H2} + \lambda_{H1} \times \lambda_{H2}^2 + \lambda_{OC} \times \lambda_{DIS} \times \lambda_{H1} + 2 \times \lambda_{OC} \times \lambda_{DIS} \times \lambda_{H2} + \lambda_{OC} \times \lambda_{H1} \times \lambda_{H2} + \lambda_{DIS} \times \lambda_{H1} \times \lambda_{H2} + \lambda_{OC} \times \lambda_{DIS} \times \mu_{OC} + \lambda_{OC} \times \lambda_{DIS} \times \mu_{DIS} + \lambda_{OC} \times \lambda_{H1} \times \mu_{OC} + \lambda_{OC} \times \lambda_{H2} \times \mu_{DIS} + \lambda_{DIS} \times \lambda_{H1} \times \mu_{DIS} + \lambda_{DIS} \times \lambda_{H2} \times \mu_{OC} + \lambda_{H1} \times \lambda_{H2} \times \mu_{OC} + \lambda_{H1} \times \lambda_{H2} \times \mu_{DIS} + \lambda_{H1} \times \mu_{OC} \times \mu_{DIS}$$

### ۳-۴-۱ | نتایج عددی تأثیر خطای انسانی بر شاخص‌های قابلیت اطمینان و زمان بهینه

#### تست دوره‌ای سیستم حفاظتی خط انتقال

در این بخش تأثیر خطای انسانی بر روی نرخ خرابی سیستم حفاظتی خط انتقال مورد بررسی قرار می‌گیرد. نرخ‌های خرابی استفاده شده برای خط انتقال در این بخش، در جدول (۲-۴) ارائه شده است. همچنین اعداد بکار رفته برای نرخ‌های این مدل سیستم حفاظتی و عنصر تحت حفاظت در جدول (۳-۴) آورده شده است. به منظور بررسی تأثیر خطای انسانی بر روی نرخ خرابی سیستم حفاظتی خط انتقال، نرخ خرابی رله‌ها ثابت در نظر گرفته شده و نرخ‌های خطای انسانی با گام ۰/۰۰۱ در ده مرحله افزایش می‌یابد.

جدول (۲-۴) نرخ‌های به کاربرده شده برای مارکوف سیستم حفاظتی و عنصر تحت حفاظت [۳۶]

نرخ‌های عملیاتی ( $\frac{\text{عملیات}}{\text{ساعت}}$ )	نرخ‌های تعمیر ( $\frac{\text{تعمیر}}{\text{ساعت}}$ )	نرخ خرابی رله‌ها ( $\frac{\text{خرابی}}{\text{سال}}$ )
$S_n = 43200$	$\mu_r = 1$ (خط انتقال)	$\lambda_c = 1$
$S_m = 21600$	$\mu_r = 2$ (ترانسفورماتور قدرت)	$\lambda_{CC} = 1$ (1/million hr)
$S_b = 0.5$	$\mu_c = 0.5$	---

جدول (۳-۴) نرخ‌های به کاربرده شده برای مدل مارکوف سیستم حفاظتی خط انتقال

نرخ‌های تعمیر ( $\frac{\text{تعمیر}}{\text{ساعت}}$ )	نرخ‌های تعمیر ( $\frac{\text{تعمیر}}{\text{ساعت}}$ )	نرخ خطای انسانی ( $\frac{\text{خرابی}}{\text{سال}}$ )	نرخ خرابی رله‌ها ( $\frac{\text{خرابی}}{\text{سال}}$ )
$\mu_H = 0.4$	$\mu_{OC} = 0.5$	$\lambda_{H2} = 0.01$	$\lambda_{OC} = 0.01$
$\mu_{tt} = 1$	$\mu_{DIF} = 0.5$	$\lambda_{H1} = 0.001$	$\lambda_{DIS} = 0.01$

#### ۴-۳-۱-۱ | تأثیر نرخ خطای انسانی بر نرخ خرابی سیستم حفاظتی خط انتقال

جدول (۴-۴) تأثیر خطای انسانی را بر روی نرخ خرابی سیستم خط انتقال نشان می‌دهد. با توجه به جدول (۴-۴)، با افزایش نرخ خطای انسانی، MTTF کاهش و متناظر با آن نرخ شکست سیستم حفاظتی افزایش می‌یابد. به طور مثال اگر نرخ‌های خطای انسانی  $\lambda_{H1}$  و  $\lambda_{H2}$  به ترتیب  $0.01$  و  $0.015$  (خرابی در سال) باشد، MTTF برابر  $99/999313$  سال و نرخ خرابی رله برابر  $0.01000069$  (خرابی در سال) می‌شود و اگر نرخ‌های خطای انسانی نوع  $\lambda_{H1}$  و  $\lambda_{H2}$  به ترتیب  $0.024$  و  $0.019$  (خرابی در سال) باشد، MTTF برابر  $52/63139$  سال و نرخ خرابی رله برابر  $0.01900068$  (خرابی در سال) می‌شود. این کاهش تقریباً  $47/36$  ساله در MTTF سیستم حفاظتی در ازای افزایش نرخ‌های خطای انسانی به اندازه  $0.009$ ، تأثیرگذاری زیاد خطای انسانی را بر روی نرخ شکست سیستم حفاظتی نشان می‌دهد. به عبارت دیگر تحت تأثیر تغییرات فوق، MTTF سیستم حفاظتی به میزان قابل توجه  $47/368$ ٪، کاهش می‌یابد.

جدول (۴-۴) تأثیر نرخ خطای انسانی بر روی نرخ خرابی سیستم حفاظتی خط انتقال

$\lambda_{H2}$ (خرابی سال)	$\lambda_{H1}$ (خرابی سال)	MTTF (سال)	$\lambda_P$ (خرابی سال)
۰/۰۱۵	۰/۰۱	۹۹/۹۹۹۳۱۳	۰/۰۱۰۰۰۰۰۶۸۷
۰/۰۱۶	۰/۰۱۱	۹۰/۹۰۸۵۲۴	۰/۰۱۱۰۰۰۰۶۸۶
۰/۰۱۷	۰/۰۱۲	۸۳/۳۳۲۸۵۵	۰/۰۱۲۰۰۰۰۶۸۹
۰/۰۱۸	۰/۰۱۳	۷۶/۹۲۲۶۶۸	۰/۰۱۳۰۰۰۰۶۹۱
۰/۰۱۹	۰/۰۱۴	۷۱/۴۲۸۲۲۳	۰/۰۱۴۰۰۰۰۶۸۳
۰/۰۲	۰/۰۱۵	۶۶/۶۶۶۳۵۹	۰/۰۱۵۰۰۰۰۶۹۲
۰/۰۲۱	۰/۰۱۶	۶۲/۴۹۹۷۳۳	۰/۰۱۶۰۰۰۰۶۸۴
۰/۰۲۲	۰/۰۱۷	۵۸/۸۲۳۲۹۲	۰/۰۱۷۰۰۰۰۶۸۶
۰/۰۲۳	۰/۰۱۸	۵۵/۵۵۵۳۴۴	۰/۰۱۸۰۰۰۰۶۸۵
۰/۰۲۴	۰/۰۱۹	۵۲/۶۳۱۳۹	۰/۰۱۹۰۰۰۰۶۸۲

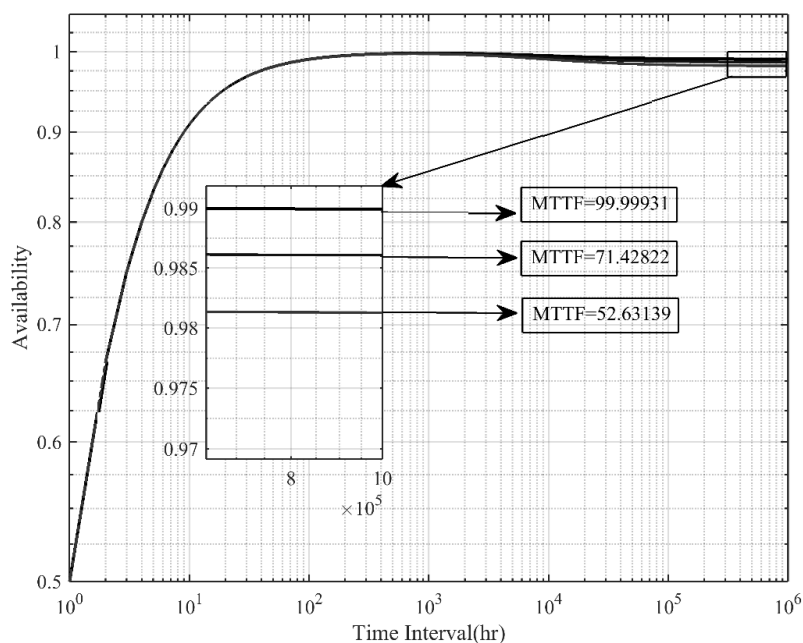
#### ۴-۳-۱-۲ | تعیین زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی خط انتقال بدون در نظر

#### گرفتن تست خودبازبینی

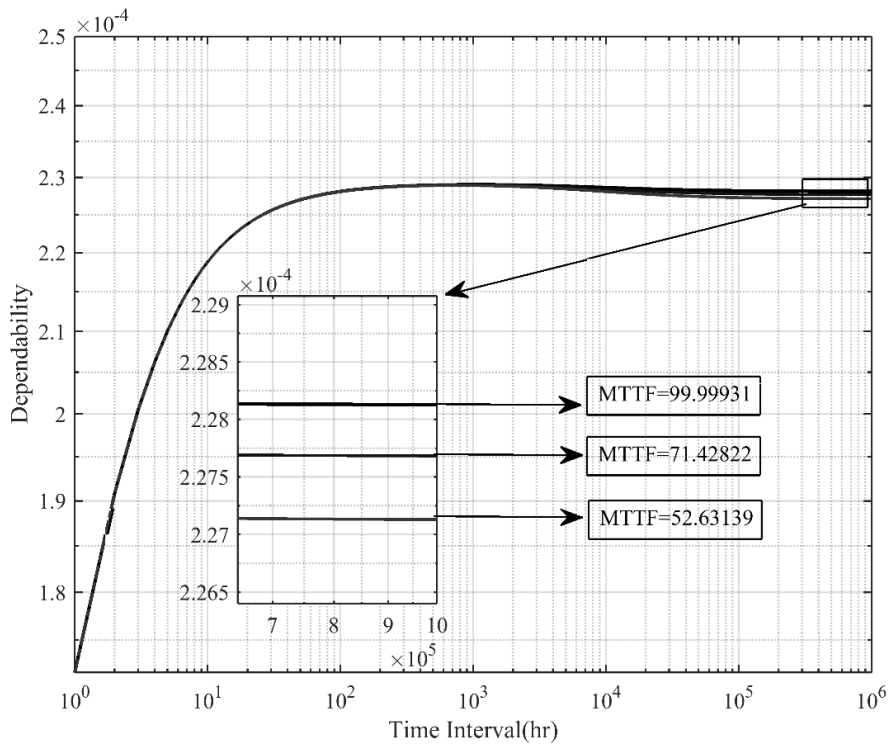
در این بخش تأثیر خطای انسانی بر روی زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی، بررسی شده است. زمان بهینه تست دوره‌ای با توجه به نرخ‌های خرابی تعیین شده در بخش قبل و بدون در نظر گرفتن امکان انجام تست خودبازبینی بدست می‌آید. نتایج شبیه‌سازی این بخش در جدول (۴-۵) و شکل (۴-۴) آورده شده است. شکل (۴-۴) برای سه MTTF متفاوت رسم شده است. شکل‌های (۴-۴) الف) و (۴-۴) ب) توصیف‌کننده شاخص‌های مطلوب قابلیت اطمینان هستند که به ترتیب دسترس‌پذیری و قابلیت اتکا سیستم حفاظتی را نشان می‌دهند. مطابق جدول (۴-۵)، با کاهش MTTF از ۹۹/۹۹۹۳۱ به ۵۲/۶۳۱۳۹ سال، احتمال دو شاخص مذکور به ترتیب از ۰/۹۹۷۷۴۶ و ۰/۰۰۲۲۹۰۲۷ به ۰/۹۹۶۹۳۹ و ۰/۰۰۲۲۸۹۳۴، کاهش می‌یابد. این مقادیر به ترتیب با ۰/۰۸۰۸ و ۰/۰۴۰۶، کاهش در شاخص‌های دسترس‌پذیری و قابلیت اتکا سیستم حفاظتی را نشان می‌دهند. شکل‌های (۴-۴) ج)، (۴-۴) د) و (۴-۴) ه) شاخص‌های نامطلوب قابلیت اطمینان، که به ترتیب دسترس‌ناپذیری، دسترس‌ناپذیری غیرعادی و امنیت سیستم حفاظتی را نشان می‌دهند. طبق جدول



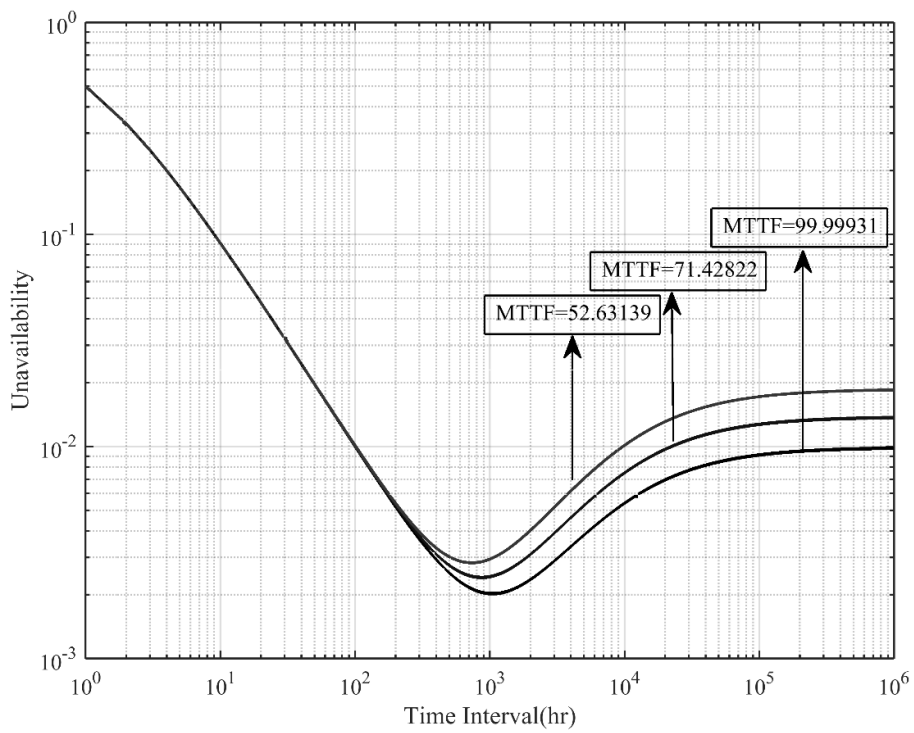
(۴-۵) احتمال سه شاخص فوق با توجه به تغییر MTTF از ۹۹/۹۹۹۳۱ به ۵۲/۶۳۱۳۹ سال، به ترتیب از  $۰/۰۰۲۰۲۱۳۲ \times 10^{-۶}$ ،  $۲/۴۵۷۰۴ \times 10^{-۶}$  و  $۱/۲۲۸۷۵ \times 10^{-۶}$  به  $۰/۰۰۲۸۲۷۸۱$ ،  $۲/۶۳۹۵۶ \times 10^{-۶}$  و  $۱/۳۲۰۲۵ \times 10^{-۶}$  افزایش می‌یابد. این مقدار تغییر به ترتیب نشان‌دهنده ۳۹/۸۹٪، ۷/۴۲۸٪ و ۶/۹۳٪ افزایش در شاخص‌های فوق است، که برای شاخص عدم دسترس‌پذیری سیستم حفاظتی، تغییر زیادی به حساب می‌آید. متناظر با این تغییرات، با افزایش نرخ خطای انسانی، بازه زمانی تست دوره‌ای از ۱۰۴۸ به ۷۳۶ ساعت، کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر بازه زمانی به میزان ۲۹/۷۷٪ کاهش یافته است، که مقداری قابل ملاحظه است.



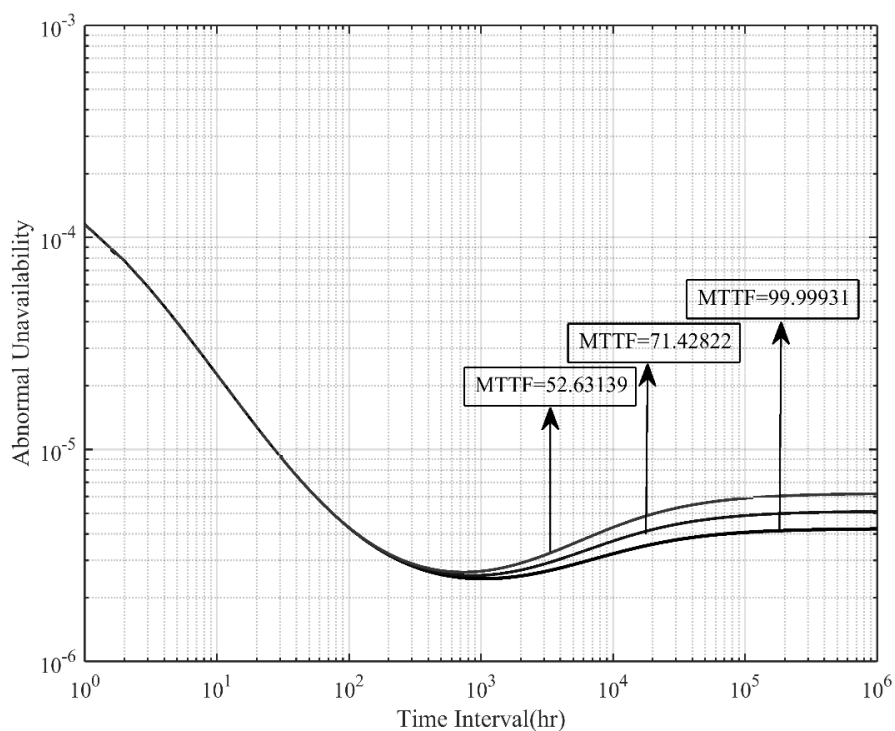
(الف)



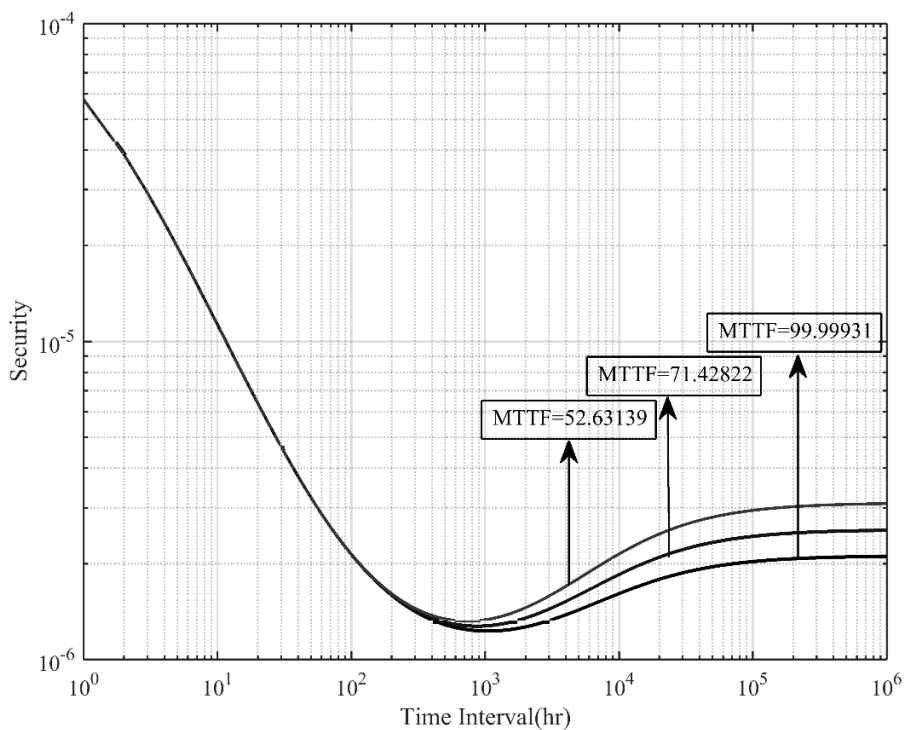
(ب)



(ج)



(د)



(ه)

شکل (۴-۴) شاخص‌های قابلیت اطمینان بدون در نظر گرفتن تست خودبازبینی برای سیستم حفاظتی خط انتقال (الف) دسترس‌پذیری (ب) قابلیت اتکا (ج) دسترس‌ناپذیری (د) دسترس‌ناپذیری غیرعادی (ه) امنیت

جدول (۴-۵) احتمال شاخص‌های قابلیت اطمینان و زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی خط انتقال بدون در نظر گرفتن تست خودبازبینی

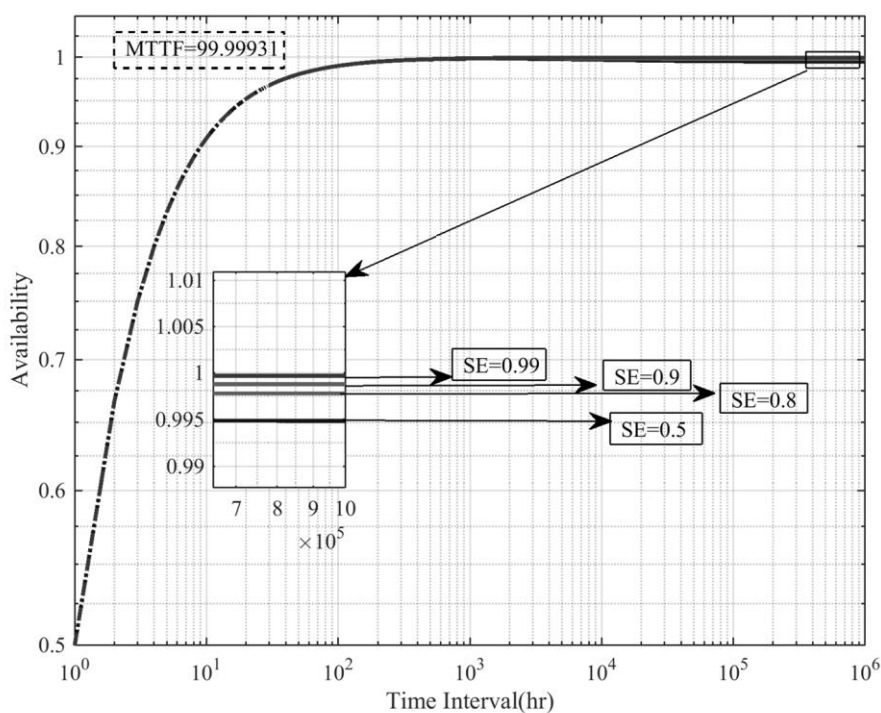
MTTF (سال)	$P_I$	$P_{II}$	$P_{III}$	$P_{IV}$	$P_V$	زمان بهینه تست دوره‌ای (ساعت)
۹۹/۹۹۹۳۱	۰/۹۹۷۷۴۶	۰/۰۰۰۲۲۹۰۲۷	۰/۰۰۲۰۲۱۳۲	$۲/۴۵۷۰۴ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۲۲۸۷۵ \times ۱۰^{-۶}$	۱۰۴۸
۹۰/۹۰۸۵۲	۰/۹۹۷۶۴۲	۰/۰۰۰۲۲۹۰۱۵	۰/۰۰۲۱۲۵۳۸	$۲/۴۸۰۵۹ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۲۴۰۵۵ \times ۱۰^{-۶}$	۹۹۴
۸۳/۳۳۲۸۶	۰/۹۹۷۵۴۲	۰/۰۰۰۲۲۹۰۰۳	۰/۰۰۲۲۲۴۸	$۲/۵۰۳۰۹ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۲۵۱۸۳ \times ۱۰^{-۶}$	۹۴۷
۷۶/۹۲۲۶۷	۰/۹۹۷۴۴۷	۰/۰۰۰۲۲۸۹۹۲	۰/۰۰۲۳۲۰۱۵	$۲/۵۲۴۶۷ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۲۶۲۶۴ \times ۱۰^{-۶}$	۹۰۶
۷۱/۴۲۸۲۲	۰/۹۹۷۳۵۵	۰/۰۰۰۲۲۸۹۸۲	۰/۰۰۲۴۱۱۸۹	$۲/۵۴۵۴۳ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۲۷۳۰۵ \times ۱۰^{-۶}$	۸۷۰
۶۶/۶۶۶۳۶	۰/۹۹۷۲۶۷	۰/۰۰۰۲۲۸۹۷۱	۰/۰۰۲۵۰۰۳۹	$۲/۵۶۵۴۶ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۲۸۳۰۹ \times ۱۰^{-۶}$	۸۳۷
۶۲/۴۹۹۷۳	۰/۹۹۷۱۸۱	۰/۰۰۰۲۲۸۹۶۲	۰/۰۰۲۵۸۵۹۹	$۲/۵۸۴۸۳ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۲۹۲۸ \times ۱۰^{-۶}$	۸۰۸
۵۸/۸۲۳۲۹	۰/۹۹۷۰۹۸	۰/۰۰۰۲۲۸۹۵۲	۰/۰۰۲۶۶۸۹۴	$۲/۶۰۳۶ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۳۰۲۲۲ \times ۱۰^{-۶}$	۷۸۲
۵۵/۵۵۵۳۴	۰/۹۹۷۰۱۸	۰/۰۰۰۲۲۸۹۴۳	۰/۰۰۲۷۴۹۴۸	$۲/۶۲۱۸۳ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۳۱۱۳۶ \times ۱۰^{-۶}$	۷۵۸
۵۲/۶۳۱۳۹	۰/۹۹۶۹۳۹	۰/۰۰۰۲۲۸۹۳۴	۰/۰۰۲۸۲۷۸۱	$۲/۶۳۹۵۶ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۳۲۰۲۵ \times ۱۰^{-۶}$	۷۳۶

## ۳-۱-۳-۴ | تعیین زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی خط انتقال با در نظر گرفتن

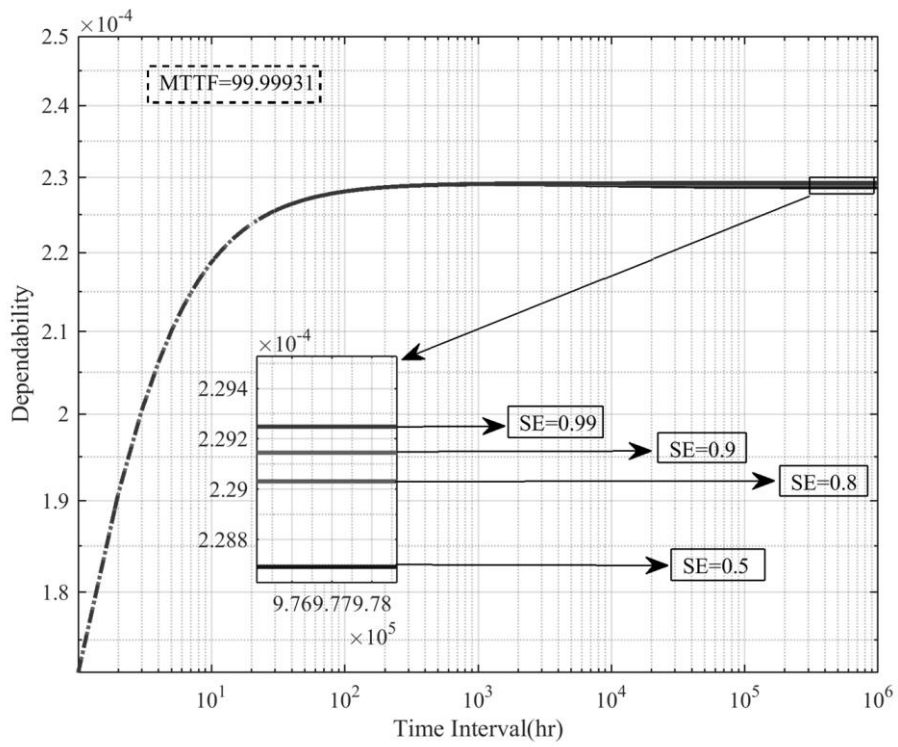
### تست خودبازبینی

در این بخش تأثیر خطای انسانی بر روی زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی خط انتقال، با در نظر گرفتن امکان انجام تست خودبازبینی در رله‌ها بررسی می‌شود. جدول (۴-۶) و شکل (۴-۵) نتایج شبیه‌سازی را با تغییر شاخص اثربخشی تست خودبازبینی برای مقادیر ۰/۵، ۰/۸، ۰/۹ و ۰/۹۹ نشان می‌دهند. شکل (۴-۵)، نمودار تغییر احتمال شاخص‌های سیستم حفاظتی را برای MTTF ۹۹/۹۹۹۳۱ سال نشان می‌دهد. بر اساس شکل‌های (۴-۵|الف)، (۴-۵|ب) با افزایش ضریب اثربخشی، شاخص‌های دسترس‌پذیری و قابلیت اتکا سیستم حفاظتی افزایش پیدا می‌کند. همچنین بر اساس شکل‌های (۴-۵|ج)، (۴-۵|د) و (۴-۵|ه)، شاخص‌های دسترس‌ناپذیری، دسترس‌ناپذیری غیرعادی و امنیت کاهش پیدا می‌کند. این نتایج نشان‌دهنده بهبود قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی با استفاده از تجهیزات خودبازبینی و افزایش ضریب اثر بخشی آن است. بر اساس جدول (۴-۶) با افزایش ضریب اثربخشی تست خودبازبینی از ۰ به ۹۹ درصد، شاخص‌های دسترس‌پذیری و قابلیت اتکا به ترتیب از ۰/۹۹۷۷۴۶ و ۰/۰۰۰۲۲۹۰۲۷ به ۰/۹۹۹۶۶۴ و ۰/۰۰۰۲۲۹۲۴۷ افزایش پیدا می‌کنند. این مقدار تغییر، به ترتیب برابر ۰/۱۹۲۲ و ۰/۰۹۶۰۵ درصد افزایش برای شاخص‌های قابلیت اطمینان است. شاخص‌های دسترس‌ناپذیری، دسترس‌ناپذیری غیرعادی و امنیت با همین مقدار افزایش ضریب اثربخشی، به ترتیب از  $۰/۰۰۲۰۲۱۳۱۶ \times ۱۰^{-۶}$ ،  $۲/۴۵۷۰۴ \times ۱۰^{-۶}$  و  $۱/۲۲۸۵۷ \times ۱۰^{-۶}$  به  $۰/۰۰۰۱۰۳$ ،  $۲/۰۲۲۷۵ \times ۱۰^{-۶}$  و  $۱/۰۱۱۷۲ \times ۱۰^{-۶}$  کاهش می‌یابد. این میزان کاهش برابر ۹۴/۹، ۱۷/۶۷ و ۱۷/۶ درصد برای شاخص‌های فوق است که تغییر زیادی برای شاخص دسترس‌ناپذیری به حساب می‌آید. اگر همین روال را برای MTTF برابر ۵۲/۶۳۱۳۹ سال در نظر گرفته شود، تغییرات برای دو شاخص اول برابر ۰/۲۶۵ و ۰/۱۳۲۷ درصد و برای سه شاخص بعدی برابر ۹۳/۴۳۵، ۲۲/۶۵ و ۲۲/۶۴ درصد می‌شود. مطابق جدول (۴-۶)، برای MTTF ۹۹/۹۹۹۳۱ سال، با افزایش ضریب اثربخشی تست خودبازبینی تا ۰/۹۹، زمان بهینه تست دوره‌ای از ۱۰۴۸ به ۱۰۶ افزایش می‌یابد، که به معنای بینهایت شدن زمان بهینه تست دوره‌ای است.

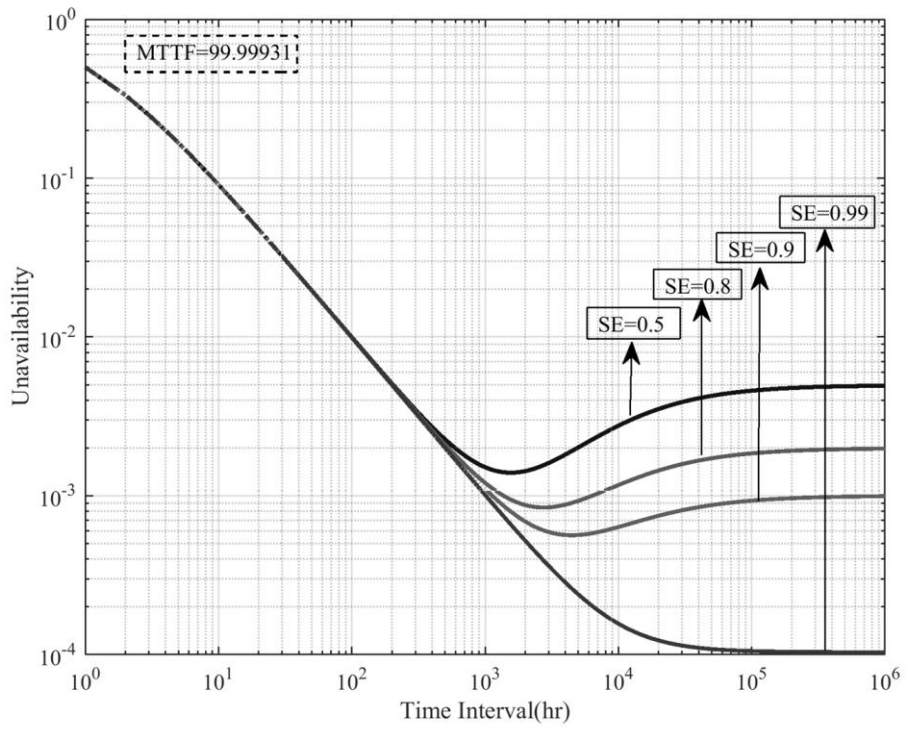
بنابراین اگر ضریب اثربخشی تست خودبازبینی به ۱۰۰ نزدیک شود دیگر نیازی به انجام تست دوره‌ای نیست. همان‌طور که جدول (۴-۶) نشان می‌دهد، برای ضریب اثربخشی ۹۹ درصد، با کاهش MTTF از ۶۶/۶۶۶۳۶ به ۵۲/۶۳۱۳۹ سال، زمان بهینه تست دوره‌ای از ۵۹۹۰۳ به ۳۰۲۰۲ ساعت تغییر کرده است. در واقع زمان بهینه تست دوره‌ای ۴۹/۵٪ کاهش یافته که مقدار زیادی برای انجام تست دوره‌ای به حساب می‌آید. همچنین برای ضریب اثربخشی ۹۰ درصد، با کاهش MTTF از ۶۶/۶۶۶۳۶ به ۵۲/۶۳۱۶۶ سال، زمان بهینه تست دوره‌ای از ۳۳۳۸ به ۲۸۴۵ ساعت تغییر کرده است، که کاهش ۱۷/۳۲٪ در زمان بهینه تست دوره‌ای را نشان می‌دهد. بر پایه این نتیجه، با افزایش ضریب اثربخشی تست خودبازبینی از ۹۰٪ به ۹۹٪، تغییر بازه زمانی تست دوره‌ای از ۱۷/۳۲٪ به ۴۹/۵٪ در اثر کاهش MTTF افزایش می‌یابد، که نشان می‌دهد با افزایش ضریب اثربخشی تست خودبازبینی، تأثیر افزایش نرخ خطای انسانی بر کاهش بازه زمانی تست دوره‌ای بیشتر می‌شود. در واقع در رله‌های مدرن که مجهز به تجهیزات خودبازبینی با ضریب اثربخشی بالا هستند، افزایش نرخ خطای انسانی تأثیر زیادی بر روی تغییر بازه زمانی تست دوره‌ای دارد.



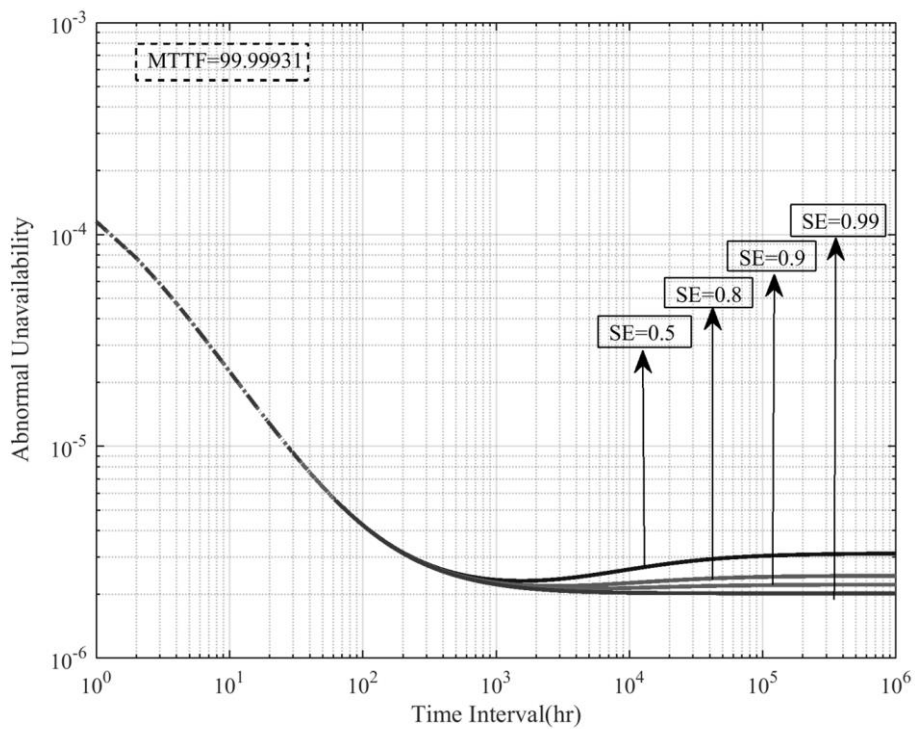
(الف)



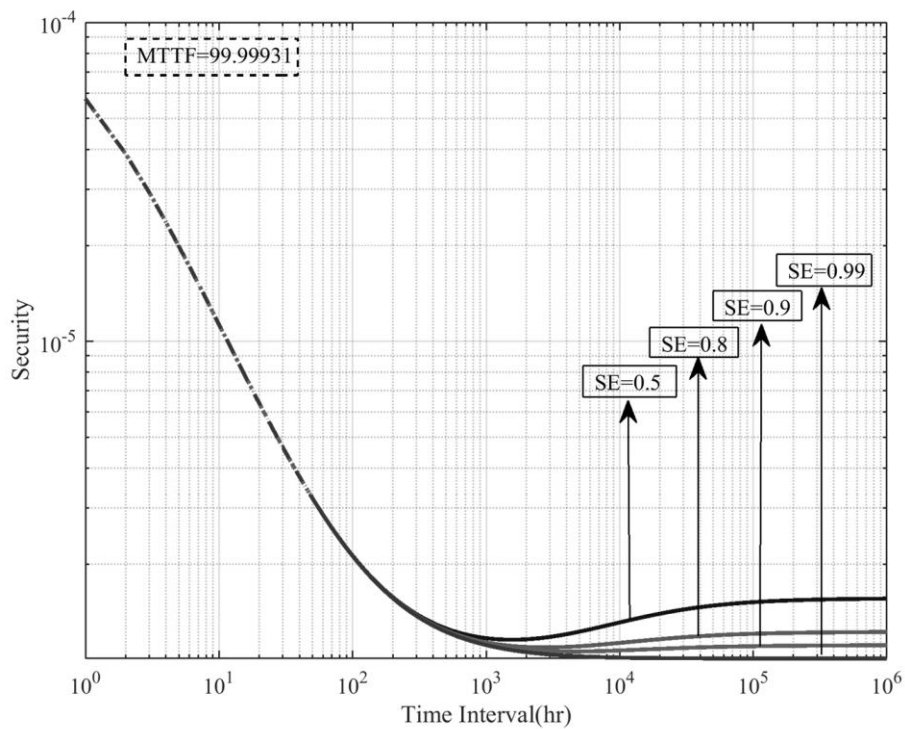
(ب)



(ج)



(د)



(ه)

شکل (۵-۴) شاخص‌های قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن تست خودبازبینی برای سیستم حفاظتی خط انتقال (الف) دسترس‌پذیری (ب) قابلیت اتکا (ج) دسترس‌ناپذیری (د) دسترس‌ناپذیری غیرعادی (ه) امنیت



جدول (۴-۶) احتمال شاخص‌های قابلیت اطمینان و زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی خط انتقال با در نظر گرفتن تست خودبازبینی

MTTF (سال)	SE	P <sub>I</sub>	P <sub>II</sub>	P <sub>III</sub>	P <sub>IV</sub>	P <sub>V</sub>	زمان بهینه تست دوره‌ای (ساعت)
۹۹/۹۹۹۳۱	۰/۵	۰/۹۹۸۳۶۹۷	۰/۰۰۰۲۲۹۰۹۹	۰/۰۰۱۳۹۷۷۵۹	$۲/۳۱۵۹۲ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۱۵۸۱۹ \times ۱۰^{-۶}$	۱۵۵۹
۹۹/۹۹۹۳۱	۰/۸	۰/۹۹۸۹۲۳۷	۰/۰۰۰۲۲۹۱۶۲	۰/۰۰۰۸۴۳۸۰۴	$۲/۱۹۰۵۵ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۰۹۵۵۱ \times ۱۰^{-۶}$	۲۷۵۰
۹۹/۹۹۹۳۱	۰/۹	۰/۹۹۹۲۰۳۳	۰/۰۰۰۲۲۹۱۹۵	۰/۰۰۰۵۶۴۳۷۹	$۲/۱۲۷۳۱ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۰۶۳۸۹ \times ۱۰^{-۶}$	۴۴۷۰
۹۹/۹۹۹۳۱	۰/۹۹	۰/۹۹۹۶۶۶۴	۰/۰۰۰۲۲۹۲۴۷	۰/۰۰۰۱۰۳	$۲/۰۲۲۷۵ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۰۱۱۷۲ \times ۱۰^{-۶}$	۱۰ <sup>۶</sup>
۹۰/۹۰۸۵۲	۰/۵	۰/۹۹۸۲۹۵۹	۰/۰۰۰۲۲۹۰۹	۰/۰۰۱۴۷۱۵۰۳	$۲/۳۳۲۶۱ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۱۶۶۵۶ \times ۱۰^{-۶}$	۱۴۷۵
۹۰/۹۰۸۵۲	۰/۸	۰/۹۹۸۸۱۷۷	۰/۰۰۰۲۲۹۱۵۷	۰/۰۰۰۸۹۰۵۸۱	$۲/۲۰۱۱۳ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۱۰۰۸۳ \times ۱۰^{-۶}$	۲۵۸۴
۹۰/۹۰۸۵۲	۰/۹	۰/۹۹۹۱۷۰۱	۰/۰۰۰۲۲۹۱۹۱	۰/۰۰۰۵۹۷۵۴۱	$۲/۱۳۴۸۱ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۰۶۷۶۷ \times ۱۰^{-۶}$	۴۱۶۳
۹۰/۹۰۸۵۲	۰/۹۹	۰/۹۹۹۶۵۴۲	۰/۰۰۰۲۲۹۲۴۶	۰/۰۰۰۱۱۳۵۰۵	$۲/۰۲۵۲۷ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۰۱۲۹ \times ۱۰^{-۶}$	۱۰ <sup>۶</sup>
۸۳/۳۳۲۸۶	۰/۵	۰/۹۹۸۲۲۵۵	۰/۰۰۰۲۲۹۰۸۲	۰/۰۰۱۵۴۱۹۶۵	$۲/۳۴۸۵۵ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۱۷۴۵۶ \times ۱۰^{-۶}$	۱۴۰۲
۸۳/۳۳۲۸۶	۰/۸	۰/۹۹۸۸۳۲۲	۰/۰۰۰۲۲۹۱۵۲	۰/۰۰۰۹۳۵۲۸۲	$۲/۲۱۱۲۵ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۱۰۵۹۱ \times ۱۰^{-۶}$	۲۴۴۴
۸۳/۳۳۲۸۶	۰/۹	۰/۹۹۹۱۳۸۴	۰/۰۰۰۲۲۹۱۸۷	۰/۰۰۰۶۲۹۲۳۵	$۲/۱۴۱۹۹ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۰۷۱۲۸ \times ۱۰^{-۶}$	۳۹۰۷
۸۳/۳۳۲۸۶	۰/۹۹	۰/۹۹۹۶۴۴۱۰	۰/۰۰۰۲۲۹۲۴۵۳	۰/۰۰۰۱۲۳۶۱	$۲/۰۲۷۵۶ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۰۱۴۰۷ \times ۱۰^{-۶}$	۳۴۷۲۷۵
۷۶/۹۲۲۶۷	۰/۵	۰/۹۹۸۱۵۷۹	۰/۰۰۰۲۲۹۰۷۴	۰/۰۰۱۶۰۹۵۴۸	$۲/۳۶۳۸۵ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۱۸۲۲۴ \times ۱۰^{-۶}$	۱۳۳۸
۷۶/۹۲۲۶۷	۰/۸	۰/۹۹۸۷۸۹۴	۰/۰۰۰۲۲۹۱۴۷	۰/۰۰۰۹۷۸۱۶۲	$۲/۲۲۰۹۵ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۱۱۰۷۹ \times ۱۰^{-۶}$	۲۳۲۲
۷۶/۹۲۲۶۷	۰/۹	۰/۹۹۹۱۰۸	۰/۰۰۰۲۲۹۱۸	۰/۰۰۰۶۵۹۶۴۱	$۲/۱۴۸۸۷ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۰۷۴۷۵ \times ۱۰^{-۶}$	۳۶۸۹
۷۶/۹۲۲۶۷	۰/۹۹	۰/۹۹۹۶۳۴۳	۰/۰۰۰۲۲۹۲۴۴	۰/۰۰۰۱۳۳۳۹۲	$۲/۰۲۹۷۷ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۰۱۵۲۱ \times ۱۰^{-۶}$	۱۳۰۵۷۵
۷۱/۴۲۸۲۲	۰/۵	۰/۹۹۸۰۹۲۸	۰/۰۰۰۲۲۹۰۶۷	۰/۰۰۱۶۷۴۵۷۷	$۲/۳۷۸۵۶ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۱۸۹۶۲ \times ۱۰^{-۶}$	۱۲۸۳
۷۱/۴۲۸۲۲	۰/۸	۰/۹۹۸۷۴۸۱	۰/۰۰۰۲۲۹۱۴۲	۰/۰۰۱۰۹۴۲۶	$۲/۲۳۰۲۹ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۱۱۵۴۹ \times ۱۰^{-۶}$	۲۲۱۶
۷۱/۴۲۸۲۲	۰/۹	۰/۹۹۹۰۷۸۷	۰/۰۰۰۲۲۹۱۸	۰/۰۰۰۶۸۸۹۰۵	$۲/۱۵۵۴۹ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۰۷۸۰۹ \times ۱۰^{-۶}$	۳۵۰۱
۷۱/۴۲۸۲۲	۰/۹۹	۰/۹۹۹۶۲۴۹۱	۰/۰۰۰۲۲۹۲۴۳	۰/۰۰۰۱۴۲۸۱	$۲/۰۳۱۹ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۰۱۶۲۹ \times ۱۰^{-۶}$	۸۱۵۸۸

ادامه جدول (۴-۶)

MTTF (سال)	SE	P <sub>I</sub>	P <sub>II</sub>	P <sub>III</sub>	P <sub>IV</sub>	P <sub>V</sub>	زمان بهینه تست دوره‌ای (ساعت)
۶۶/۶۶۶۳۶	۰/۵	۰/۹۹۸۰۳	۰/۰۰۰۲۲۹۰۵۹	۰/۰۰۱۷۳۷۳۲۲	$۲/۳۹۲۷۶ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۱۹۶۷۵ \times ۱۰^{-۶}$	۱۲۳۳
۶۶/۶۶۶۳۶	۰/۸	۰/۹۹۸۷۰۸۲	۰/۰۰۰۲۲۹۱۳۷	۰/۰۰۱۰۵۹۲۴۷	$۲/۲۳۹۳۱ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۱۲۰۰۲ \times ۱۰^{-۶}$	۲۱۲۳
۶۶/۶۶۶۳۶	۰/۹	۰/۹۹۹۰۵۰۴	۰/۰۰۰۲۲۹۱۷۷	۰/۰۰۰۷۱۷۱۴۸	$۲/۱۶۱۸۸ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۰۸۱۳۱ \times ۱۰^{-۶}$	۳۳۳۸
۶۶/۶۶۶۳۶	۰/۹۹	۰/۹۹۹۶۱۶	۰/۰۰۰۲۲۹۲۴۲	۰/۰۰۰۱۵۱۹۱	$۲/۰۳۳۹۶ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۰۱۷۳۵ \times ۱۰^{-۶}$	۵۹۹۰۳
۶۲/۴۹۹۷۳	۰/۵	۰/۹۹۷۹۶۹۳	۰/۰۰۰۲۲۹۰۵۲	۰/۰۰۱۷۹۸۰۰۸	$۲/۴۰۶۵ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۲۰۳۶۴ \times ۱۰^{-۶}$	۱۱۸۸
۶۲/۴۹۹۷۳	۰/۸	۰/۹۹۸۶۶۹۷	۰/۰۰۰۲۲۹۱۳۳	۰/۰۰۱۰۹۷۷۶۵	$۲/۲۴۸۰۲ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۱۲۴۴ \times ۱۰^{-۶}$	۲۰۴۰
۶۲/۴۹۹۷۳	۰/۹	۰/۹۹۹۰۲۳۱	۰/۰۰۰۲۲۹۱۷۴	۰/۰۰۰۷۴۴۴۷	$۲/۱۶۸۰۷ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۰۸۴۴۳ \times ۱۰^{-۶}$	۳۱۹۳
۶۲/۴۹۹۷۳	۰/۹۹	۰/۹۹۹۶۰۷	۰/۰۰۰۲۲۹۲۴۱	۰/۰۰۰۱۶۰۷۱	$۲/۰۳۵۹۵ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۰۱۸۳۷ \times ۱۰^{-۶}$	۴۷۶۵۴
۵۸/۸۲۳۲۹	۰/۵	۰/۹۹۷۹۱۰۵	۰/۰۰۰۲۲۹۰۴۶	۰/۰۰۱۸۵۶۸۲۶	$۲/۴۱۹۸۱ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۲۱۰۳۲ \times ۱۰^{-۶}$	۱۱۴۸
۵۸/۸۲۳۲۹	۰/۸	۰/۹۹۸۶۳۲۴	۰/۰۰۰۲۲۹۱۲۹	۰/۰۰۱۱۳۵۱۰۱	$۲/۲۵۶۴۷ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۱۲۸۶۵ \times ۱۰^{-۶}$	۱۹۶۵
۵۸/۸۲۳۲۹	۰/۹	۰/۹۹۸۹۹۶۶	۰/۰۰۰۲۲۹۱۷۱	۰/۰۰۰۷۷۰۹۵۷	$۲/۱۷۴۰۶ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۰۸۷۴۵ \times ۱۰^{-۶}$	۳۰۶۴
۵۸/۸۲۳۲۹	۰/۹۹	۰/۹۹۹۵۹۸	۰/۰۰۰۲۲۹۲۴	۰/۰۰۰۱۶۹۲۶	$۲/۰۳۷۸۹ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۰۱۹۳۶ \times ۱۰^{-۶}$	۳۹۷۷۱
۵۵/۵۵۵۳۴	۰/۵	۰/۹۹۷۸۵۳۴	۰/۰۰۰۲۲۹۰۳۹	۰/۰۰۱۹۱۳۹۳۷	$۲/۴۳۲۷۴ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۲۱۶۸۱ \times ۱۰^{-۶}$	۱۱۱۲
۵۵/۵۵۵۳۴	۰/۸	۰/۹۹۸۵۹۶۱	۰/۰۰۰۲۲۹۱۲۴	۰/۰۰۱۱۷۱۳۵۸	$۲/۲۶۴۶۸ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۱۳۲۷۸ \times ۱۰^{-۶}$	۱۸۹۸
۵۵/۵۵۵۳۴	۰/۹	۰/۹۹۸۹۷۰۹	۰/۰۰۰۲۲۹۱۶۸	۰/۰۰۰۷۹۶۶۸	$۲/۱۷۹۸۸ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۰۹۰۳۹ \times ۱۰^{-۶}$	۲۹۴۹
۵۵/۵۵۵۳۴	۰/۹۹	۰/۹۹۹۵۹	۰/۰۰۰۲۲۹۲۳۹	۰/۰۰۰۱۷۷۵۶	$۲/۰۳۹۷۷ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۰۲۰۳۳ \times ۱۰^{-۶}$	۳۴۲۶۷
۵۲/۶۳۱۳۹	۰/۵	۰/۹۹۷۷۹۷۸	۰/۰۰۰۲۲۹۰۳۲	۰/۰۰۱۹۶۹۴۸۳	$۲/۴۴۵۳۱ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۲۲۳۱۲ \times ۱۰^{-۶}$	۱۰۷۹
۵۲/۶۳۱۳۹	۰/۸	۰/۹۹۸۵۶۰۸	۰/۰۰۰۲۲۹۱۲	۰/۰۰۱۲۰۶۶۲۵	$۲/۲۷۲۶۶ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۱۳۶۸ \times ۱۰^{-۶}$	۱۸۳۷
۵۲/۶۳۱۳۹	۰/۹	۰/۹۹۸۹۴۶	۰/۰۰۰۲۲۹۱۶	۰/۰۰۰۸۲۱۷۰	$۲/۱۸۵۵۴ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۰۹۳۲۴ \times ۱۰^{-۶}$	۲۸۴۵
۵۲/۶۳۱۳۹	۰/۹۹	۰/۹۹۹۵۸۲	۰/۰۰۰۲۲۹۲۳۸	۰/۰۰۰۱۸۵۶۴	$۲/۰۴۱۵۹ \times ۱۰^{-۶}$	$۱/۰۲۱۲۷ \times ۱۰^{-۶}$	۳۰۲۰۲

## ۴-۴ | مدل مارکوف پیشنهادی برای تعیین نرخ خرابی سیستم حفاظتی

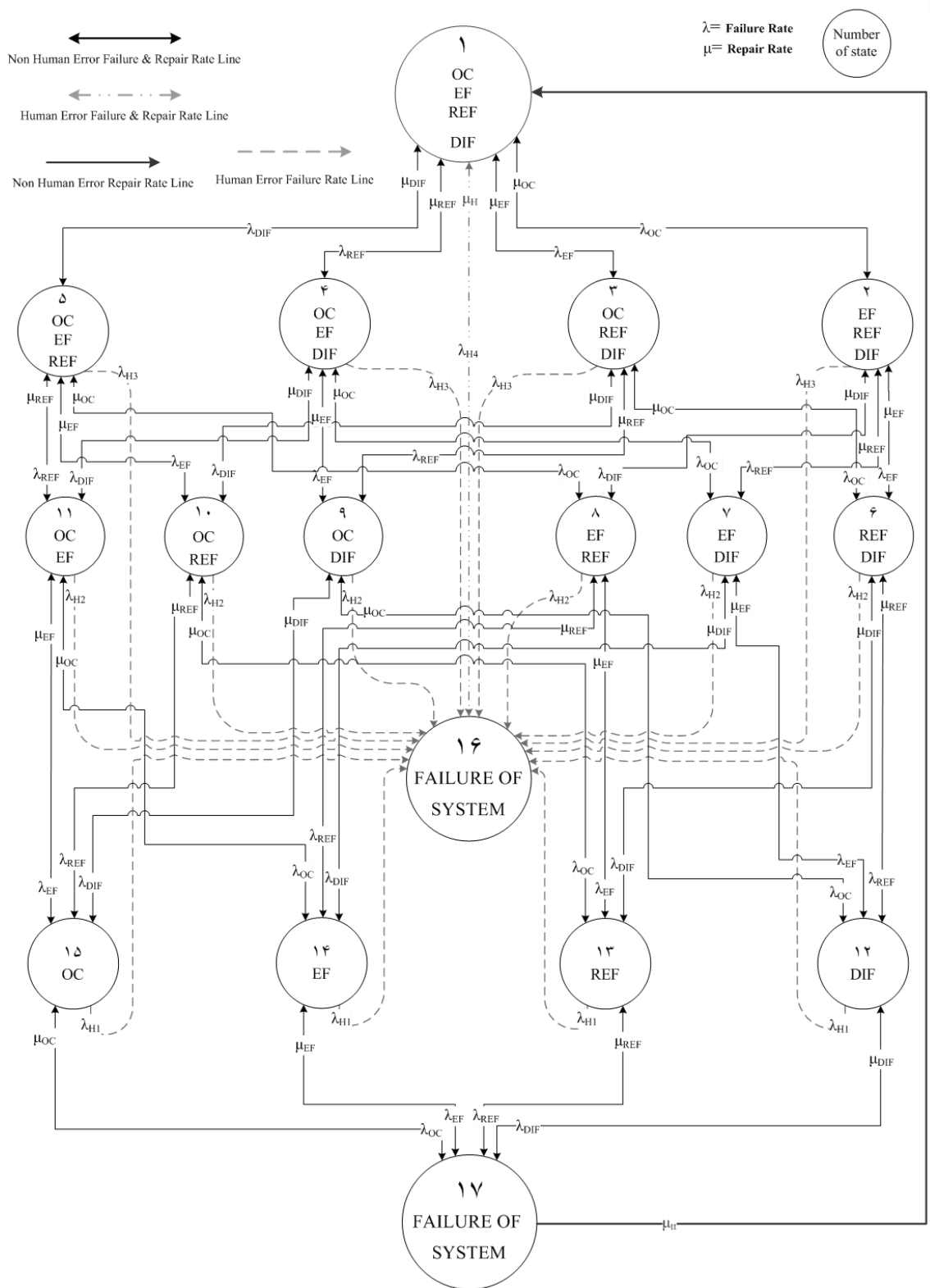
### ترانسفورماتور قدرت

برای تعیین نرخ خرابی سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت با توجه به نرخ خطای انسانی، بر اساس مدل مارکوف پیشنهادی، فرض می‌شود که سیستم حفاظت ترانسفورماتور قدرت از چهار رله اضافه جریان، خطای زمین، خطای زمین محدود شده و دیفرانسیل تشکیل شده است. شکل (۴-۶)، مدل مارکوف پیشنهادی برای سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت را با توجه به همان فرضیات ارائه شده در بخش قبل نشان می‌دهد. مدل مارکوف پیشنهادی دارای ۱۷ حالت می‌باشد، که در ادامه به تشریح آن پرداخته می‌شود.

در حالت ۱، تمام رله‌ها سالم می‌باشند و سیستم حفاظتی دسترس پذیر است. نمادهای اختصاری آورده شده در دایره‌ها نشان‌دهنده نام اختصاری رله‌های سالم می‌باشد. به عنوان مثال در این حالت رله‌های اضافه جریان، خطای زمین، خطای زمین محدود شده و دیفرانسیل همگی سالم هستند. با خراب شدن هر یک از رله‌ها، مدل به حالت‌های ۲ تا ۵ وارد می‌شود. در هر یک از حالت‌های ۲ تا ۵ اگر رله‌ای تعمیر شود، مدل به حالت ۱ بر می‌گردد. به عنوان مثال اگر مدل در حالت ۳ قرار داشته باشد و رله خطای زمین تعمیر شود، مدل از حالت ۳ با نرخ  $\mu_{EF}$  به حالت ۱ باز می‌گردد. اگر در حالت ۱ سیستم حفاظتی با خطای انسانی مواجه شود، مدل با نرخ  $\lambda_{H4}$  حالت ۱۶ انتقال می‌یابد و سیستم حفاظتی دچار شکست کامل می‌شود. در حالت‌های ۲ تا ۵، با خراب شدن یک رله دیگر، مدل وارد حالت‌های ۶ تا ۱۱ می‌شود. اگر در هر یک از حالت‌های ۶ تا ۱۱، دو رله شکست خورده تعمیر شوند، مدل با تعمیر هر یک از رله‌ها به حالت مورد نظر بازگردانده می‌شود. به عنوان مثال اگر مدل در حالت ۸ قرار داشته باشد و رله دیفرانسیل تعمیر شود، مدل با نرخ تعمیر  $\mu_{DIF}$  به حالت ۲ باز می‌گردد. همچنین اگر رله اضافه جریان تعمیر شود، مدل با نرخ تعمیر  $\mu_{OC}$  به حالت ۵ باز می‌گردد. اگر در حالت‌های ۲ تا ۵ یک خطای انسانی رخ دهد، مدل با نرخ  $\lambda_{H3}$  وارد حالت ۱۶ می‌شود. اگر مدل مارکوف در حالت‌های ۶ تا ۱۱ باشد و یک رله دیگر خراب شود، مدل مارکوف وارد مراحل ۱۲ تا ۱۵ می‌شود. در هر یک از این حالت‌ها رله

با ۳ نرخ تعمیر که برای ۳ رله متفاوت است، می‌تواند به یکی از ۳ حالت قبلی باز گردد. با وقوع خطای انسانی در هر یک از مراحل ۱۲ تا ۱۵، مدل مارکوف با نرخ  $\lambda_{H2}$ ، به حالت ۱۶ می‌رود. در حالت‌های ۱۲ تا ۱۵ تنها یک رله سالم در مدل وجود دارد، هرگاه تنها رله سالم خراب شود، مدل مارکوف وارد حالت ۱۷ می‌شود که به معنای شکست سیستم حفاظتی است. خطای انسانی در هر یک از حالت‌های ۱۲ تا ۱۵، باعث شکست سیستم حفاظتی می‌شود و مدل با نرخ خرابی  $\lambda_{H1}$  وارد حالت ۱۶ می‌شود. مدل از حالت ۱۷ که بیان‌گر شکست کامل سیستم حفاظتی ناشی از خرابی‌ها غیر از خطای انسانی است با نرخ  $\mu_t$  به حالت ۱ بر می‌گردد. مدل با نرخ خرابی  $\mu_H$  از حالت ۱۶ که بیان‌گر شکست کامل سیستم حفاظتی به سبب بروز خطای انسانی است، به حالت ۱ انتقال می‌یابد. توجه شود که نرخ خطای انسانی از مراحل ۱ تا ۱۵ ( $\lambda_{H4}$  تا  $\lambda_{H1}$ ) کاهش می‌یابد. زیرا احتمال وقوع خطای انسانی زمانی که چهار رله در سیستم حفاظتی وجود دارد نسبت به زمانی که یک رله وجود دارد، بیش‌تر است.

ماتریس گذرای **M** مدل مارکوف سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت در رابطه (۴-۱۴) آورده شده است. ماتریس بدست آمده یک ماتریس با تعداد سطر و ستون ۱۷ است. همچنین رابطه (۴-۱۵) ماتریس **Q** را که از حذف حالت‌های مربوط به شکست کامل سیستم حفاظتی از ماتریس گذرای مدل مارکوف بدست آمده، را نشان می‌دهد. درآیه‌های قطری ماتریس‌های **M** و **Q** از رابطه (۴-۱۶) بدست می‌آید. نرخ خرابی رله‌های سیستم حفاظتی ترانسفورماتور مطابق روابط ارائه شده در بخش پیشین با توجه به MTTF ارائه شده در رابطه (۴-۱۷) بدست می‌آید.



شکل (۴-۶) مدل مارکوف پیشنهادی برای تعیین نرخ خرابی سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت با در نظر گرفتن خطای انسانی

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix}
A_1 & \lambda_{OC} & \lambda_{EF} & \lambda_{REF} & \lambda_{DIF} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{H4} & 0 \\
\mu_{OC} & A_2 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{EF} & \lambda_{REF} & \lambda_{DIF} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{H3} & 0 \\
\mu_{EF} & 0 & A_3 & 0 & 0 & \lambda_{OC} & 0 & 0 & \lambda_{REF} & \lambda_{DIF} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{H3} & 0 \\
\mu_{REF} & 0 & 0 & A_4 & 0 & 0 & \lambda_{OC} & 0 & \lambda_{EF} & 0 & \lambda_{DIF} & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{H3} & 0 \\
\mu_{DIF} & 0 & 0 & 0 & A_5 & 0 & 0 & \lambda_{OC} & 0 & \lambda_{EF} & \lambda_{REF} & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{H3} & 0 \\
0 & \mu_{EF} & \mu_{OC} & 0 & 0 & A_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{REF} & \lambda_{DIF} & 0 & 0 & \lambda_{H2} & 0 \\
0 & \mu_{REF} & 0 & \mu_{OC} & 0 & 0 & A_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{EF} & 0 & \lambda_{DIF} & 0 & \lambda_{H2} & 0 \\
0 & \mu_{DIF} & 0 & 0 & \mu_{OC} & 0 & 0 & A_8 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{EF} & \lambda_{REF} & 0 & \lambda_{H2} & 0 \\
0 & 0 & \mu_{REF} & \mu_{EF} & 0 & 0 & 0 & 0 & A_9 & 0 & 0 & \lambda_{OC} & 0 & 0 & \lambda_{DIF} & \lambda_{H2} & 0 \\
0 & 0 & \mu_{DIF} & 0 & \mu_{EF} & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{10} & 0 & 0 & \lambda_{OC} & 0 & \lambda_{REF} & \lambda_{H2} & 0 \\
0 & 0 & 0 & \mu_{DIF} & \mu_{REF} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{11} & 0 & 0 & \lambda_{OC} & \lambda_{EF} & \lambda_{H2} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_{REF} & \mu_{EF} & 0 & \mu_{OC} & 0 & 0 & A_{12} & 0 & 0 & 0 & \lambda_{H1} & \lambda_{DIF} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_{DIF} & 0 & \mu_{EF} & 0 & \mu_{OC} & 0 & 0 & A_{13} & 0 & 0 & \lambda_{H1} & \lambda_{REF} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_{DIF} & \mu_{REF} & 0 & 0 & \mu_{OC} & 0 & 0 & A_{14} & 0 & \lambda_{H1} & \lambda_{EF} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_{DIF} & \mu_{REF} & \mu_{EF} & 0 & 0 & 0 & A_{15} & \lambda_{H1} & \lambda_{OC} \\
\mu_H & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{16} & 0 \\
\mu_t & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_{DIF} & \mu_{REF} & \mu_{EF} & \mu_{OC} & 0 & A_{17}
\end{bmatrix} \quad (14-4)$$

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix}
A_1 & \lambda_{OC} & \lambda_{EF} & \lambda_{REF} & \lambda_{DIF} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\mu_{OC} & A_2 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{EF} & \lambda_{REF} & \lambda_{DIF} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\mu_{EF} & 0 & A_3 & 0 & 0 & \lambda_{OC} & 0 & 0 & \lambda_{REF} & \lambda_{DIF} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\mu_{REF} & 0 & 0 & A_4 & 0 & 0 & \lambda_{OC} & 0 & \lambda_{EF} & 0 & \lambda_{DIF} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
\mu_{DIF} & 0 & 0 & 0 & A_5 & 0 & 0 & \lambda_{OC} & 0 & \lambda_{EF} & \lambda_{REF} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & \mu_{EF} & \mu_{OC} & 0 & 0 & A_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{REF} & \lambda_{DIF} & 0 & 0 \\
0 & \mu_{REF} & 0 & \mu_{OC} & 0 & 0 & A_7 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{EF} & 0 & \lambda_{DIF} & 0 \\
0 & \mu_{DIF} & 0 & 0 & \mu_{OC} & 0 & 0 & A_8 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_{EF} & \lambda_{REF} & 0 \\
0 & 0 & \mu_{REF} & \mu_{EF} & 0 & 0 & 0 & 0 & A_9 & 0 & 0 & \lambda_{OC} & 0 & 0 & \lambda_{REF} \\
0 & 0 & \mu_{DIF} & 0 & \mu_{EF} & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{10} & 0 & 0 & \lambda_{OC} & 0 & \lambda_{REF} \\
0 & 0 & 0 & \mu_{DIF} & \mu_{REF} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{11} & 0 & 0 & \lambda_{OC} & \lambda_{EF} \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_{REF} & \mu_{EF} & 0 & \mu_{OC} & 0 & 0 & A_{12} & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_{DIF} & 0 & \mu_{EF} & 0 & \mu_{OC} & 0 & 0 & A_{13} & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_{DIF} & \mu_{REF} & 0 & 0 & \mu_{OC} & 0 & 0 & A_{14} & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_{DIF} & \mu_{REF} & \mu_{EF} & 0 & 0 & 0 & A_{15}
\end{bmatrix} \quad (15-4)$$

$$\begin{aligned}
A_1 &= 1 - \lambda_{OC} - \lambda_{EF} - \lambda_{REF} - \lambda_{DIF} - \lambda_{H4} & , & & A_2 &= 1 - \lambda_{EF} - \lambda_{REF} - \lambda_{DIF} - \mu_{OC} - \lambda_{H3} \\
A_3 &= 1 - \lambda_{OC} - \lambda_{REF} - \lambda_{DIF} - \mu_{DIF} - \lambda_{H3} & , & & A_4 &= 1 - \lambda_{OC} - \lambda_{EF} - \lambda_{DIF} - \mu_{REF} - \lambda_{H3} \\
A_5 &= 1 - \lambda_{OC} - \lambda_{EF} - \lambda_{REF} - \mu_{DIF} - \lambda_{H3} & , & & A_6 &= 1 - \lambda_{REF} - \lambda_{DIF} - \mu_{OC} - \mu_{EF} - \lambda_{H2} \\
A_7 &= 1 - \lambda_{EF} - \lambda_{DIF} - \mu_{OC} - \mu_{REF} - \lambda_{H2} & , & & A_8 &= 1 - \lambda_{EF} - \lambda_{REF} - \mu_{OC} - \mu_{DIF} - \lambda_{H2} \\
A_9 &= 1 - \lambda_{OC} - \lambda_{DIF} - \mu_{REF} - \mu_{EF} - \lambda_{H2} & , & & A_{10} &= 1 - \lambda_{OC} - \lambda_{REF} - \mu_{EF} - \mu_{DIF} - \lambda_{H2} \\
A_{11} &= 1 - \lambda_{OC} - \lambda_{EF} - \mu_{REF} - \mu_{DIF} - \lambda_{H2} & , & & A_{12} &= 1 - \lambda_{DIF} - \mu_{REF} - \mu_{EF} - \mu_{OC} - \lambda_{H1} \\
A_{13} &= 1 - \lambda_{REF} - \mu_{OC} - \mu_{EF} - \mu_{DIF} - \lambda_{H1} & , & & A_{14} &= 1 - \lambda_{EF} - \mu_{OC} - \mu_{REF} - \mu_{DIF} - \lambda_{H1} \\
A_{15} &= 1 - \lambda_{OC} - \mu_{EF} - \mu_{REF} - \mu_{DIF} - \lambda_{H1} & , & & A_{16} &= 1 - \mu_H \\
A_{17} &= 1 - \mu_t - \mu_{OC} - \mu_{EF} - \mu_{REF} - \lambda_{DIF}
\end{aligned}
\tag{۱۶-۴}$$

$$MTTF = \mathbf{w}_{(1,1)} + \dots + \mathbf{w}_{(1,14)} + \mathbf{w}_{(1,15)} \tag{۱۷-۴}$$

#### ۴-۴-۱ | نتایج عددی تأثیر خطای انسانی بر روی شاخص‌های قابلیت اطمینان و زمان بهینه

##### تست دوره‌ای سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت

در این بخش به بررسی تأثیر خطای انسانی بر روی نرخ خرابی سیستم حفاظتی و در پی آن بر روی شاخص‌های قابلیت اطمینان و زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت پرداخته می‌شود. نرخ‌های خرابی استفاده شده در این شبیه‌سازی‌ها در جدول (۴-۷) ارائه شده است.

جدول (۴-۷) نرخ‌های به کار برده شده برای مدل‌های مارکوف پیشنهادی

نرخ‌های تعمیر (rep/hr)	نرخ‌های تعمیر (rep/hr)	نرخ خطای انسانی (f/yr)	نرخ خرابی رله‌ها (f/yr)
$\mu_H = 0/5$	$\mu_{OC} = 0/5$	$\lambda_{H4} = 0/01$	$\lambda_{OC} = 0/01$
$\mu_t = 2$	$\mu_{EF} = 0/5$	$\lambda_{H3} = 0/007$	$\lambda_{EF} = 0/01$
— — —	$\mu_{REF} = 0/5$	$\lambda_{H2} = 0/004$	$\lambda_{REF} = 0/01$
— — —	$\mu_{DIF} = 0/5$	$\lambda_{H1} = 0/001$	$\lambda_{DIF} = 0/01$

#### ۴-۴-۱-۱ | تأثیر نرخ خطای انسانی بر نرخ خرابی سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت

برای بررسی تأثیر خطای انسانی بر روی نرخ خرابی سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت، نرخ خرابی رله‌ها ثابت در نظر گرفته می‌شود و نرخ‌های خرابی مربوط به خطای انسانی با گام  $0/001$  در ده مرحله افزایش داده شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی‌ها در جدول (۴-۸) نشان داده شده است. با توجه به نتایج این جدول با افزایش نرخ خطای انسانی، MTTF کاهش و متناظر با آن نرخ شکست سیستم حفاظتی



ترانسفورماتور قدرت افزایش می‌یابد. به طور مثال اگر نرخ‌های خطای انسانی مذکور به ترتیب ۰/۰۱، ۰/۰۰۷، ۰/۰۰۴ و ۰/۰۰۱ (خرابی در سال) باشد، MTTF برابر ۱۰۰/۰۰۰۳ سال و نرخ خرابی رله برابر ۰/۰۰۹۹۹۹۹۷۳ (خرابی در سال) می‌شود. اگر نرخ‌های خطای انسانی نوع ۱ تا نوع ۴ به ترتیب ۰/۰۱۹، ۰/۰۱۶، ۰/۰۱۳ و ۰/۰۱ (خرابی در سال) باشد، MTTF برابر ۵۲/۶۳۱۶۶ سال و نرخ خرابی رله برابر ۰/۰۱۸۹۹۹۹۹۷۳ (خرابی در سال) می‌شود. این کاهش تقریباً ۴۷/۵ ساله در MTTF سیستم حفاظتی در ازای افزایش ۰/۰۰۹ (خرابی در سال) نرخ‌های خطای انسانی، تأثیرگذاری زیاد این نرخ را بر روی نرخ شکست سیستم حفاظتی نشان می‌دهد، به عبارت دیگر تحت تغییرات فوق مدت زمان خرابی به میزان قابل توجه ۴۷/۴٪، کاهش می‌یابد. نرخ شکست سیستم حفاظتی نشان می‌دهد، به عبارت دیگر تحت تغییرات فوق مدت زمان خرابی به میزان قابل توجه ۴۷/۴٪، کاهش می‌یابد.

جدول (۴-۸) تأثیر خطای انسانی بر روی نرخ خرابی سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت

$\lambda_{H4}$ (خرابی سال)	$\lambda_{H3}$ (خرابی سال)	$\lambda_{H2}$ (خرابی سال)	$\lambda_{H1}$ (خرابی سال)	MTTF (سال)	$\lambda_p$ (خرابی سال)
۰/۰۱	۰/۰۰۷	۰/۰۰۴	۰/۰۰۱	۱۰۰/۰۰۰۳	۰/۰۰۹۹۹۹۹۷۳
۰/۰۱۱	۰/۰۰۸	۰/۰۰۵	۰/۰۰۲	۹۰/۹۰۹۳۲	۰/۰۱۰۹۹۹۹۷۳
۰/۰۱۲	۰/۰۰۹	۰/۰۰۶	۰/۰۰۳	۸۳/۳۳۳۵۳	۰/۰۱۱۹۹۹۹۷۳
۰/۰۱۳	۰/۰۱	۰/۰۰۷	۰/۰۰۴	۷۶/۹۲۳۲۴	۰/۰۱۲۹۹۹۹۷۳
۰/۰۱۴	۰/۰۱۱	۰/۰۰۸	۰/۰۰۵	۷۱/۷۲۸۷۱	۰/۰۱۳۹۹۹۹۷۳
۰/۰۱۵	۰/۰۱۲	۰/۰۰۹	۰/۰۰۶	۶۶/۶۶۶۷۹	۰/۰۱۴۹۹۹۹۷۳
۰/۰۱۶	۰/۰۱۳	۰/۰۱	۰/۰۰۷	۶۲/۵۰۰۱۱	۰/۰۱۵۹۹۹۹۷۳
۰/۰۱۷	۰/۰۱۴	۰/۰۱۱	۰/۰۰۸	۵۸/۸۲۳۶۲	۰/۰۱۶۹۹۹۹۷۳
۰/۰۱۸	۰/۰۱۵	۰/۰۱۲	۰/۰۰۹	۵۵/۵۵۵۶۴	۰/۰۱۷۹۹۹۹۷۳
۰/۰۱۹	۰/۰۱۶	۰/۰۱۳	۰/۰۱	۵۲/۶۳۱۶۶	۰/۰۱۸۹۹۹۹۷۳

## ۴-۱-۲ | تعیین زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت بدون

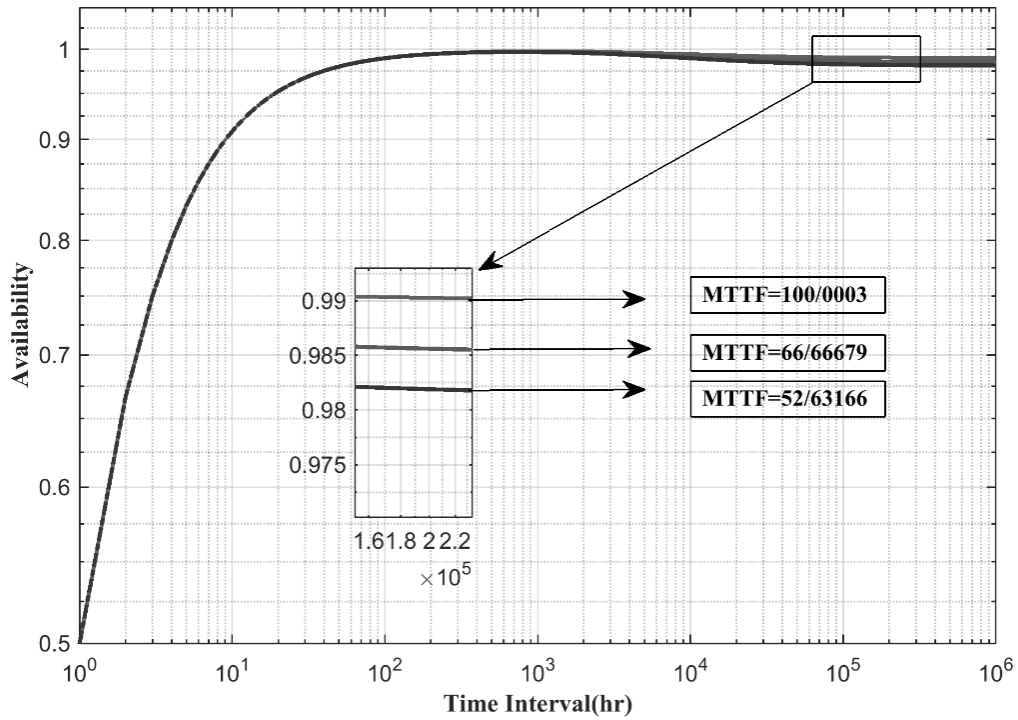
### در نظر گرفتن تست خودبازبینی

در این بخش به منظور بررسی تأثیر خطای انسانی بر روی زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی، زمان بهینه تست با توجه به نرخ‌های خرابی تعیین شده در بخش قبل بدست می‌آیند. نتایج شبیه‌سازی در جدول (۹-۴) و شکل (۷-۴) آورده شده است. شکل (۷-۴) برای سه MTTF متفاوت رسم شده است. شکل‌های (۷-۴|الف) و (۷-۴|ب) توصیف‌کننده شاخص‌های مطلوب قابلیت اطمینان که به ترتیب دسترس‌پذیری و قابلیت اتکا سیستم حفاظتی را نشان می‌دهد. مطابق جدول (۹-۴) با کاهش MTTF از  $100/0003$  به  $52/63139$  سال، احتمال دو شاخص مذکور به ترتیب از  $0/99774861$  و  $0/000229764$  به  $0/99694347$  و  $0/000229726$ ، یعنی به میزان  $0/08$ ٪ و  $0/165$ ٪، کاهش می‌یابد.

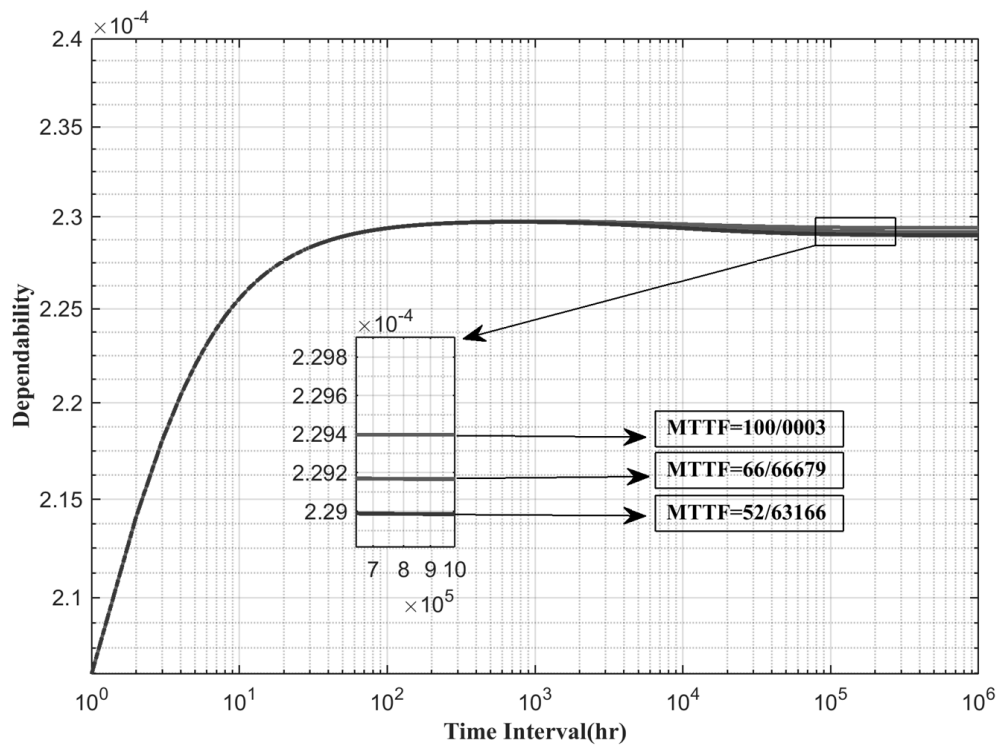
شکل‌های (۷-۴|ج)، (۷-۴|د) و (۷-۴|ه)، شاخص‌های نامطلوب قابلیت اطمینان هستند که به ترتیب دسترس‌ناپذیری، دسترس‌ناپذیری غیرعادی و امنیت را نشان می‌دهند. طبق جدول (۹-۴)، با کاهش MTTF از  $100/0003$  به  $52/63166$  سال، احتمال سه شاخص فوق به ترتیب از  $0/00201868$ ،  $10^{-6}$  و  $10^{-7}$  به  $4/91382 \times 10^{-7}$ ،  $0/0028223634$  و  $2/63861 \times 10^{-6}$  افزایش می‌یابد، که به ترتیب نشان‌دهنده  $39/8$ ٪،  $7/416$ ٪ و  $7/433$ ٪ تغییر در شاخص‌های گفته شده است. این مقدار تغییر برای شاخص عدم دسترس‌پذیری سیستم حفاظتی، تغییر زیادی به حساب می‌آید. متناظر با این تغییرات، بازه زمانی تست دوره‌ای سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت به میزان  $29/77$ ٪ کاهش می‌یابد، که قابل ملاحظه است.

جدول (۹-۴) احتمال شاخص‌های قابلیت اطمینان و زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت بدون در نظر گرفتن تست خودبازبینی

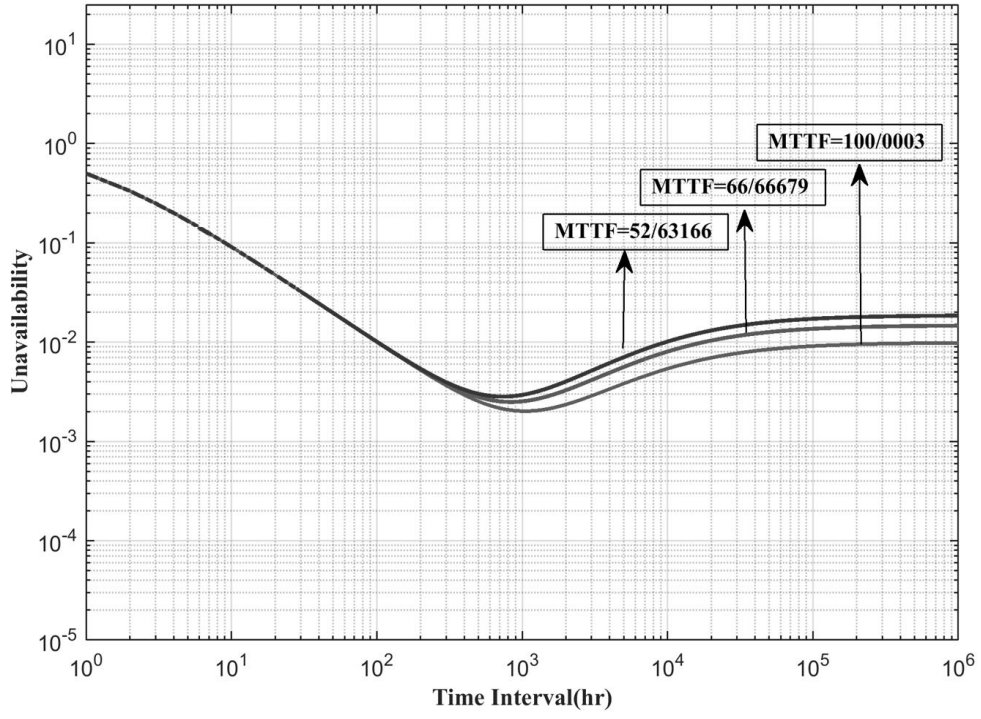
MTTF(سال)	P <sub>I</sub>	P <sub>II</sub>	P <sub>III</sub>	P <sub>IV</sub>	P <sub>V</sub>	بازه زمانی بهینه تست دوره‌ای (ساعت)
۱۰۰/۰۰۰۳	۰/۹۹۷۷۴۸۶۱	۰/۰۰۰۲۲۹۷۶۴	۰/۰۰۲۰۱۸۶۸	۲/۴۵۶۴۴×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۹۱۳۸۲×۱۰ <sup>-۷</sup>	۱۰۴۸
۹۰/۹۰۹۳۲	۰/۹۹۷۶۴۴۷۲	۰/۰۰۰۲۲۹۷۵۹	۰/۰۰۲۱۲۲۵۷۲	۲/۴۷۹۹۵×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۹۶۰۹۴×۱۰ <sup>-۷</sup>	۹۹۴
۸۳/۳۳۳۵۳	۰/۹۹۷۵۴۵۴۲	۰/۰۰۰۲۲۹۷۵۴	۰/۰۰۲۲۲۱۸۲۱	۲/۵۰۲۴۱×۱۰ <sup>-۶</sup>	۵/۰۰۵۹۷×۱۰ <sup>-۷</sup>	۹۴۷
۷۶/۹۲۳۲۴	۰/۹۹۷۴۵۰۲۳	۰/۰۰۰۲۲۹۷۵	۰/۰۰۲۳۱۶۹۹۸	۲/۵۲۳۹۵×۱۰ <sup>-۶</sup>	۵/۰۴۹۱۵×۱۰ <sup>-۷</sup>	۹۰۶
۷۱/۴۲۸۷۱	۰/۹۹۷۳۵۸۶۲	۰/۰۰۰۲۲۹۷۴۶	۰/۰۰۲۴۰۸۵۶۵	۲/۵۴۴۶۸×۱۰ <sup>-۶</sup>	۵/۰۹۰۷×۱۰ <sup>-۷</sup>	۸۷۰
۶۶/۶۶۶۷۹	۰/۹۹۷۲۷۰۲۹	۰/۰۰۰۲۲۹۷۴۱	۰/۰۰۲۴۹۶۹۰۱	۲/۵۶۴۶۷×۱۰ <sup>-۶</sup>	۵/۱۳۰۷۹×۱۰ <sup>-۷</sup>	۸۳۷
۶۲/۵۰۰۱۱	۰/۹۹۷۱۸۴۸۱	۰/۰۰۰۲۲۹۷۳۷	۰/۰۰۲۵۸۲۳۲۶	۲/۵۸۴×۱۰ <sup>-۶</sup>	۵/۱۶۹۵۶×۱۰ <sup>-۷</sup>	۸۰۸
۵۸/۸۲۳۶۲	۰/۹۹۷۱۰۲۰۲	۰/۰۰۰۲۲۹۷۳۳	۰/۰۰۲۶۶۵۱۰۹	۲/۶۰۲۷۴×۱۰ <sup>-۶</sup>	۵/۲۰۷۱۴×۱۰ <sup>-۷</sup>	۷۸۲
۵۵/۵۵۵۶۴	۰/۹۹۷۰۲۱۶۸	۰/۰۰۰۲۲۹۷۳	۰/۰۰۲۷۴۵۴۷۸	۲/۶۲۰۹۳×۱۰ <sup>-۶</sup>	۵/۲۴۳۶۲×۱۰ <sup>-۷</sup>	۷۵۸
۵۲/۶۳۱۶۶	۰/۹۹۶۹۴۳۴۷	۰/۰۰۰۲۲۹۷۲۶	۰/۰۰۲۸۲۳۶۳۴	۲/۶۳۸۶۱×۱۰ <sup>-۶</sup>	۵/۲۷۹۱×۱۰ <sup>-۷</sup>	۷۳۶



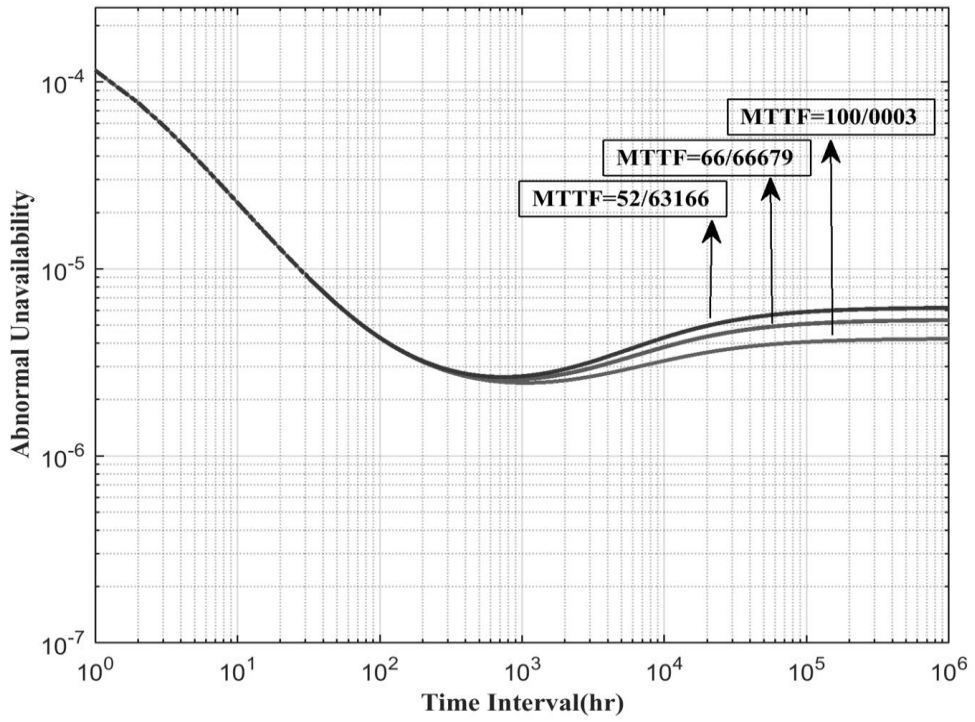
(الف)



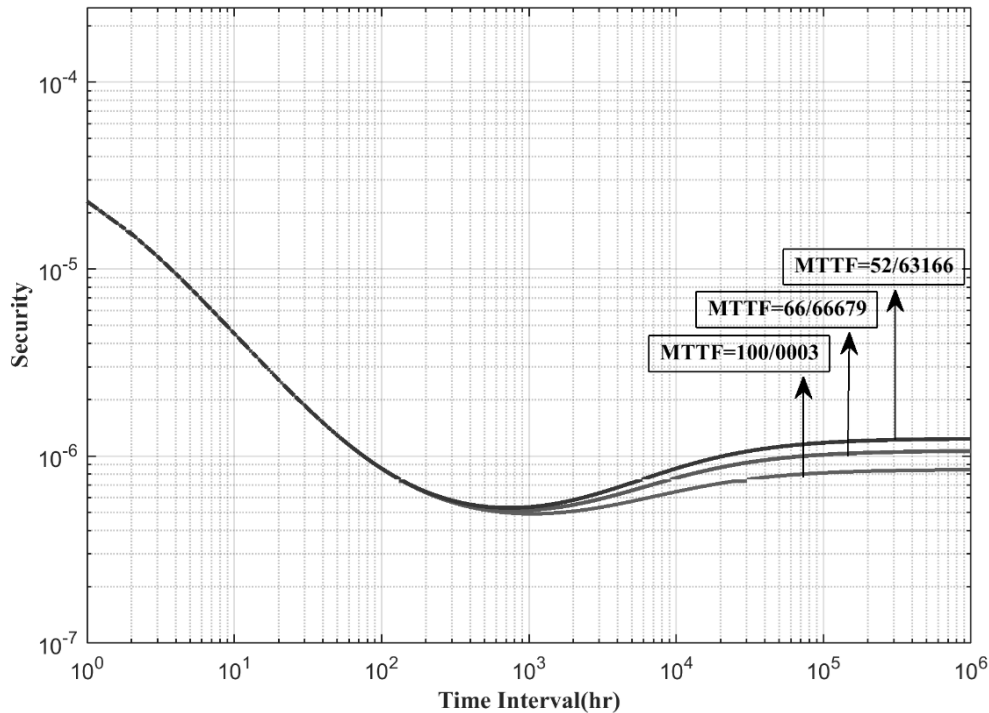
(ب)



(c)



(d)



(ه)

شکل (۷-۴) شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت بدون در نظر گرفتن تست خودبازبینی (الف) دسترس پذیری (ب) قابلیت اتکا (ج) دسترس ناپذیری (د) دسترس ناپذیری غیرعادی (ه) امنیت

#### ۴-۱-۳ | تعیین زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت با در

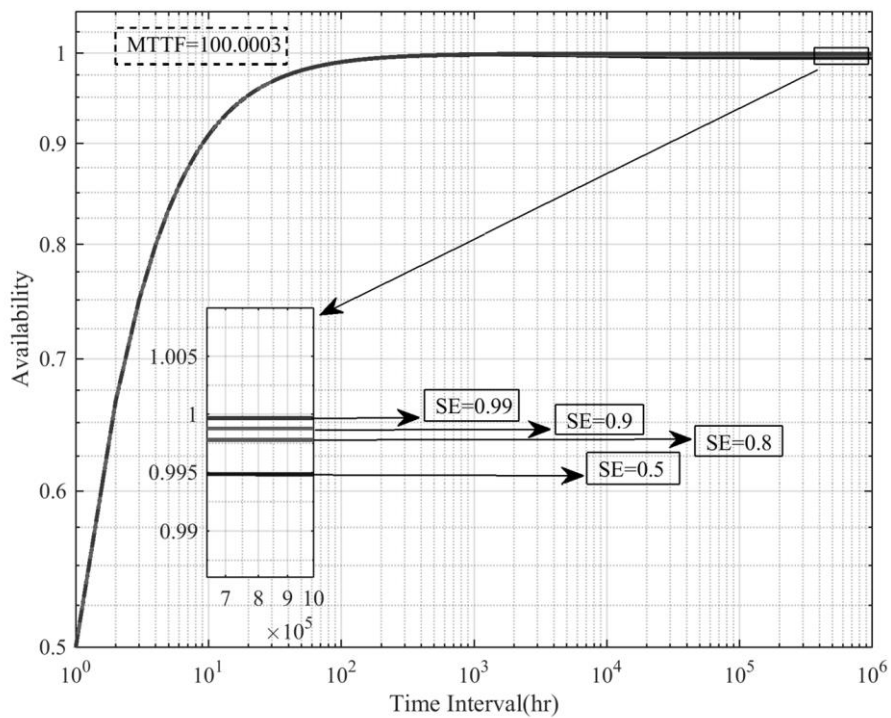
##### نظر گرفتن تست خودبازبینی

در این بخش به بررسی تأثیر خطای انسانی بر روی زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت با در نظر گرفتن امکان انجام تست خودبازبینی در رله‌ها پرداخته می‌شود. جدول (۴-۱۰) و شکل (۴-۸) نتایج شبیه‌سازی را تغییر ضریب اثر بخشی تست خودبازبینی برای مقادیر ۰/۵، ۰/۸، ۰/۹ و ۰/۹۹ نشان می‌دهند. شکل (۴-۸)، نمودار تغییر احتمال شاخص‌های سیستم حفاظتی را برای  $MTTF = 100000/3$  سال نشان می‌دهد. بر اساس شکل‌های (۴-۸|الف) و (۴-۸|ب) با افزایش ضریب اثربخشی، شاخص‌های دسترس پذیری و قابلیت اتکا سیستم حفاظتی افزایش پیدا می‌کند. همچنین بر اساس شکل‌های (۴-۸|ج)، (۴-۸|د) و (۴-۸|ه)، با همین مقدار تغییر در اندازه ضریب اثربخشی، شاخص‌های دسترس ناپذیری، دسترس ناپذیری غیرعادی و امنیت کاهش پیدا می‌کنند که می‌دهد،

قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی با استفاده از ابزار خودبازبینی و افزایش ضریب اثر بخشی آن بهبود یافته است. بر اساس جدول (۴-۱۰) با افزایش ضریب اثربخشی تست خودبازبینی از ۰ به ۹۹ درصد، شاخص‌های دسترس‌پذیری و قابلیت اتکا به ترتیب از  $0/99774861$  و  $0/000229764$  به  $0/99966693$  و  $0/000229855$  افزایش پیدا می‌کنند. این مقدار تغییر، به ترتیب برابر  $0/1922$  و  $0/395$  درصد افزایش برای شاخص‌های گفته شده است. شاخص‌های دسترس‌ناپذیری، دسترس‌ناپذیری غیرعادی و امنیت با افزایش ضریب اثربخشی تست خودبازبینی از ۰ به ۹۹ درصد، به ترتیب از  $0/00201868$ ،  $0/000100764$  و  $2/45644 \times 10^{-6}$  و  $4/91382 \times 10^{-7}$  به  $2/02239 \times 10^{-6}$ ،  $0/000100764$  و  $4/04573 \times 10^{-7}$  کاهش می‌یابند. این میزان کاهش برابر ۹۵،  $17/6698$  و  $17/6662$  درصد کاهش برای شاخص‌های فوق است. این مقادیر، تغییرات زیادی برای شاخص دسترس‌ناپذیری به حساب می‌آید. برای MTTF  $52/63166$  سال، دو شاخص اول به ترتیب  $0/1265$  و  $0/0544$  و سه شاخص آخر  $93/57$ ،  $22/66$  و  $22/65$  درصد بهتر می‌شوند. این نتیجه‌گیری مشابه نتیجه‌گیری همین بخش از سیستم حفاظتی خط انتقال است و می‌توان این نتیجه‌گیری را این‌گونه بیان کرد که تست خودبازبینی بیشترین تأثیر را در بهبود شاخص‌های نامطلوب قابلیت اطمینان دارد. و در بین این شاخص بیشترین تأثیر را بر روی شاخص دسترس‌ناپذیری دارد.

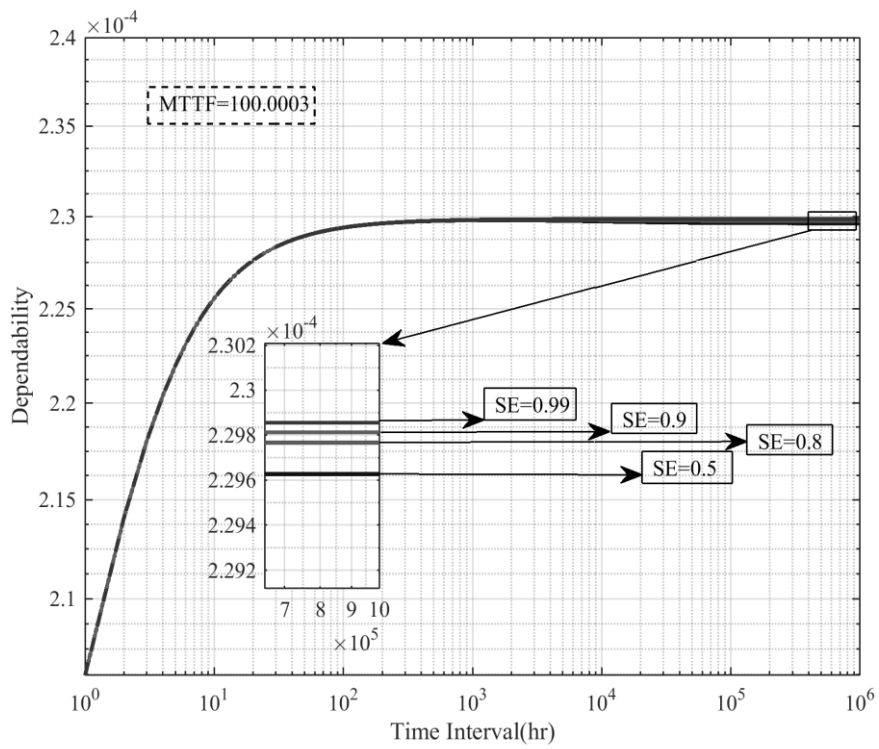
مطابق جدول (۴-۱۰)، برای MTTF  $100/003$  سال، با افزایش ضریب اثربخشی تست خودبازبینی تا  $0/99$ ، زمان بهینه تست دوره‌ای از  $1048$  به  $10^6$  افزایش می‌یابد، که به معنای عدم نیاز به انجام تست دوره‌ای برای سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت است. همان‌طور که جدول (۴-۱۰) نشان می‌دهد، برای ضریب اثربخشی ۹۹ درصد، با کاهش MTTF از  $71/42871$  به  $52/63166$  سال، زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی از مقدار بیشینه  $81519$  به  $30191$  ساعت تغییر کرده است. در واقع زمان بهینه تست دوره‌ای  $62/96\%$  کاهش یافته که مقدار زیادی برای تست دوره‌ای محسوب می‌شود. همچنین برای ضریب اثربخشی ۹۰ درصد، با کاهش MTTF از  $71/42871$  به  $52/63166$  سال، زمان بهینه تست دوره‌ای از مقدار  $3501$  به  $2844$  ساعت تغییر کرده است که کاهش  $18/76\%$  در زمان بهینه

تست دوره‌ای را نشان می‌دهد. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند، با افزایش ضریب اثربخشی تست خودبازبینی از ۹۰٪ به ۹۹٪، تغییر بازه زمانی تست دوره‌ای از ۱۸/۷۶ به ۶۲/۹۶٪ افزایش می‌یابد که نشان می‌دهد با افزایش ضریب اثربخشی تست خودبازبینی، تأثیر افزایش نرخ خطای انسانی بر کاهش بازه زمانی تست دوره‌ای بیشتر می‌شود.

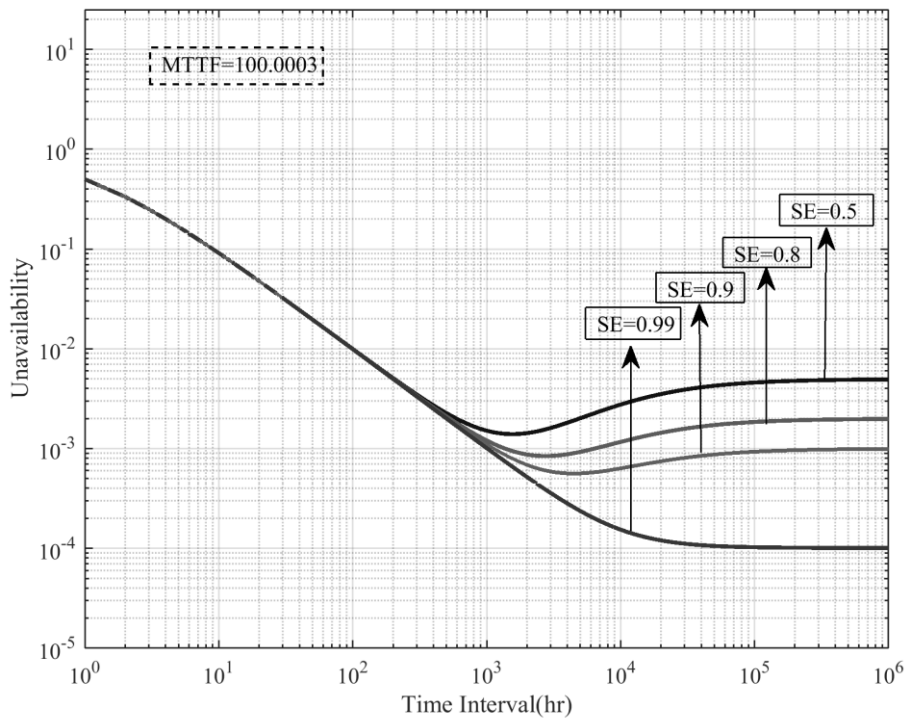


(الف)

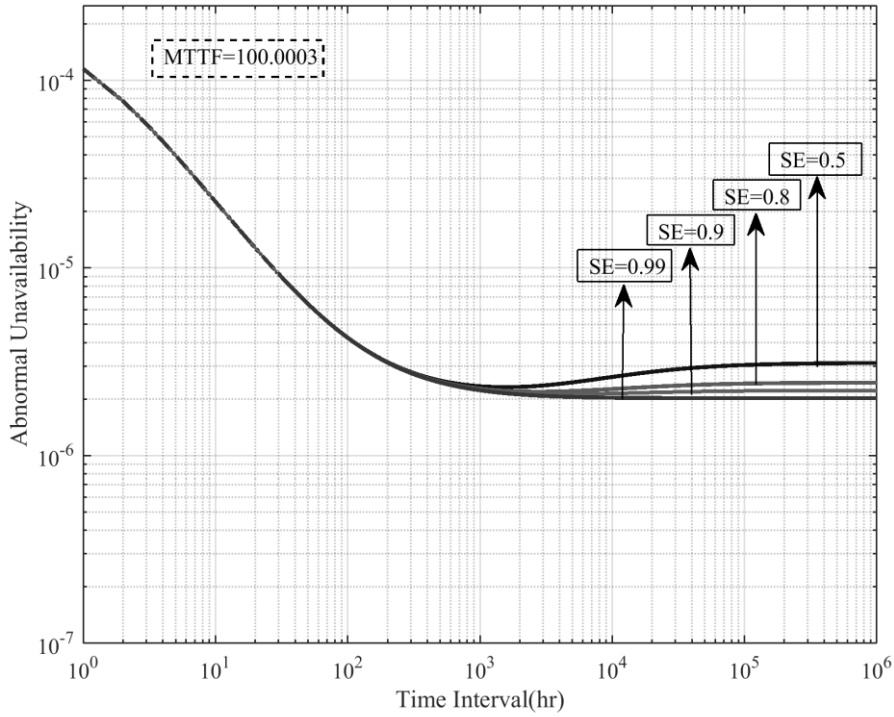




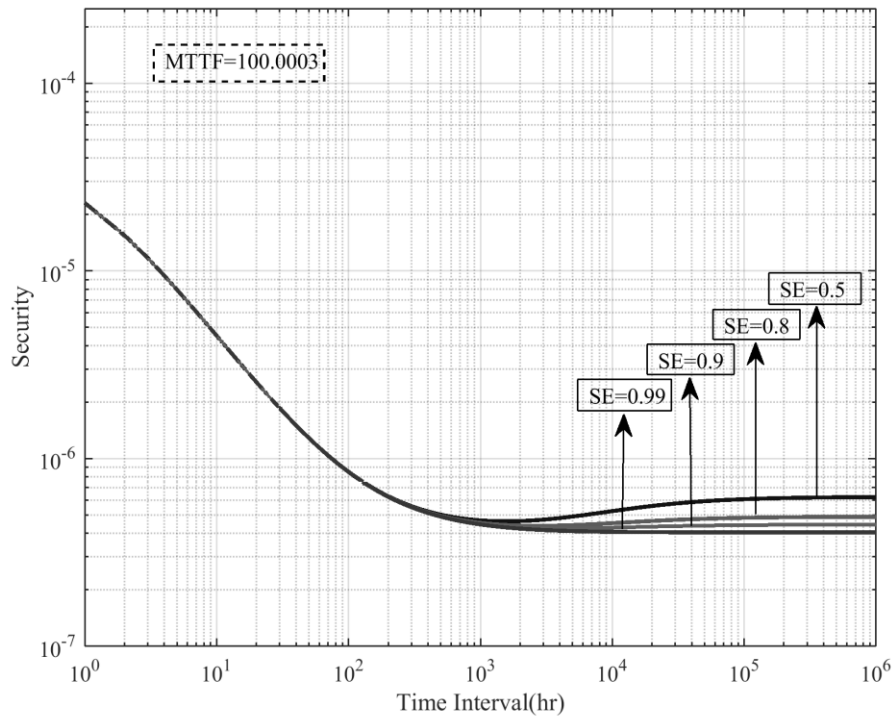
(ب)



(ج)



(د)



(ه)

شکل (۴-۸) شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت با در نظر گرفتن تست خودبازبینی (الف) دسترس پذیری (ب) قابلیت اتکا (ج) دسترس ناپذیری (د) دسترس ناپذیری غیرعادی (ه) امنیت

جدول (۴-۱۰) احتمال شاخص‌های قابلیت اطمینان و زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت با در نظر گرفتن تست خودبازبینی

MTTF (سال)	SE	P <sub>I</sub>	P <sub>II</sub>	P <sub>III</sub>	P <sub>IV</sub>	P <sub>V</sub>	بازه زمانی بهینه تست دوره‌ای (ساعت)
۱۰۰/۰۰۰۳	۰/۵	۰/۹۹۸۳۷۲۳۲	۰/۰۰۰۲۲۹۷۹۴	۰/۰۰۱۳۹۵۱۳۳	۲/۳۱۵۳۲×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۶۳۱۵۹×۱۰ <sup>-۷</sup>	۱۵۵۹
۱۰۰/۰۰۰۳	۰/۸	۰/۹۹۸۹۲۶۳۴	۰/۰۰۰۲۲۹۸۲	۰/۰۰۰۸۴۱۱۸۸	۲/۱۸۹۹۶×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۳۸۰۸۶×۱۰ <sup>-۷</sup>	۲۷۵۰
۱۰۰/۰۰۰۳	۰/۹	۰/۹۹۹۲۰۵۸۳	۰/۰۰۰۲۲۹۸۳۳	۰/۰۰۰۵۶۱۷۶۷	۲/۱۲۶۷۲×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۲۵۴۳۹×۱۰ <sup>-۷</sup>	۴۴۷۰
۱۰۰/۰۰۰۳	۰/۹۹	۰/۹۹۹۶۶۶۹۳	۰/۰۰۰۲۲۹۸۵۵	۰/۰۰۰۱۰۰۷۶۴	۲/۰۲۲۳۹×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۰۴۵۷۳×۱۰ <sup>-۷</sup>	۱۰ <sup>۶</sup>
۹۰/۹۰۹۳۲	۰/۵	۰/۹۹۸۲۹۸۷	۰/۰۰۰۲۲۹۷۹	۰/۰۰۱۴۶۸۷۰۷	۲/۳۳۱۹۷×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۶۶۴۹۹×۱۰ <sup>-۷</sup>	۱۴۷۴
۹۰/۹۰۹۳۲	۰/۸	۰/۹۹۸۸۷۹۷۳	۰/۰۰۰۲۲۹۸۱۸	۰/۰۰۰۸۸۷۷۹۴	۲/۲۰۰۵×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۴۰۲۰۶×۱۰ <sup>-۷</sup>	۲۵۸۴
۹۰/۹۰۹۳۲	۰/۹	۰/۹۹۹۱۷۲۸۷	۰/۰۰۰۲۲۹۸۳۱	۰/۰۰۰۵۹۴۷۵۸	۲/۱۳۴۱۸×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۲۶۹۴۲×۱۰ <sup>-۷</sup>	۴۱۶۳
۹۰/۹۰۹۳۲	۰/۹۹	۰/۹۹۹۶۵۶۹۸	۰/۰۰۰۲۲۹۸۵۴	۰/۰۰۰۱۱۰۷۲۹	۲/۰۲۴۶۴×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۰۵۰۳۴×۱۰ <sup>-۷</sup>	۱۰ <sup>۶</sup>
۸۳/۳۳۳۵۳	۰/۵	۰/۹۹۸۲۲۸۳۷	۰/۰۰۰۲۲۹۷۸۷	۰/۰۰۱۵۳۸۹۹۷	۲/۳۴۷۸۸×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۶۹۶۹۱×۱۰ <sup>-۷</sup>	۱۴۰۲
۸۳/۳۳۳۵۳	۰/۸	۰/۹۹۸۸۳۵۲۱	۰/۰۰۰۲۲۹۸۱۶	۰/۰۰۰۹۳۲۳۲۳	۲/۲۱۰۵۸×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۴۲۲۳۲×۱۰ <sup>-۷</sup>	۲۴۴۳
۸۳/۳۳۳۵۳	۰/۹	۰/۹۹۹۱۴۱۳۴	۰/۰۰۰۲۲۹۸۳	۰/۰۰۰۶۲۶۲۸۱	۲/۱۴۱۳۲×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۲۸۳۸×۱۰ <sup>-۷</sup>	۳۹۰۷
۸۳/۳۳۳۵۳	۰/۹۹	۰/۹۹۹۶۴۷۰۲	۰/۰۰۰۲۲۹۸۵۴	۰/۰۰۰۱۲۰۶۶۳	۲/۰۲۶۸۹×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۰۵۴۹۵×۱۰ <sup>-۷</sup>	۳۴۶۱۲۸
۷۶/۹۲۳۲۴	۰/۵	۰/۹۹۸۱۶۰۹۶	۰/۰۰۰۲۲۹۷۸۴	۰/۰۰۱۶۰۶۴۰۸	۲/۳۶۳۱۴×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۷۲۷۵۳×۱۰ <sup>-۷</sup>	۱۳۳۸
۷۶/۹۲۳۲۴	۰/۸	۰/۹۹۸۷۹۲۴۷	۰/۰۰۰۲۲۹۸۱۳	۰/۰۰۰۹۷۵۰۳۱	۲/۲۲۰۲۵×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۴۴۱۷۵×۱۰ <sup>-۷</sup>	۲۳۲۲
۷۶/۹۲۳۲۴	۰/۹	۰/۹۹۹۱۱۱۰۶	۰/۰۰۰۲۲۹۸۲۹	۰/۰۰۰۶۵۶۵۱۶	۲/۱۴۸۱۶×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۲۹۷۵۹×۱۰ <sup>-۷</sup>	۳۶۸۹
۷۶/۹۲۳۲۴	۰/۹۹	۰/۹۹۹۶۳۷۴۲	۰/۰۰۰۲۲۹۸۵۳	۰/۰۰۰۱۳۰۲۷۳	۲/۰۲۹۰۶×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۰۵۹۴×۱۰ <sup>-۷</sup>	۱۳۰۴۰۶
۷۱/۴۲۸۷۱	۰/۵	۰/۹۹۸۰۹۶۱۱	۰/۰۰۰۲۲۹۷۸۱	۰/۰۰۱۶۷۱۲۶۶	۲/۳۷۷۸۱×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۷۵۶۹۹×۱۰ <sup>-۷</sup>	۱۲۸۲
۷۱/۴۲۸۷۱	۰/۸	۰/۹۹۸۷۵۱۴	۰/۰۰۰۲۲۹۸۱۲	۰/۰۰۱۰۱۶۱۲۵	۲/۲۲۹۵۵×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۴۶۰۴۶×۱۰ <sup>-۷</sup>	۲۲۱۶
۷۱/۴۲۸۷۱	۰/۹	۰/۹۹۹۰۸۱۹۷	۰/۰۰۰۲۲۹۸۲۷	۰/۰۰۰۶۸۵۶۰۹	۲/۱۵۴۷۵×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۳۱۰۸۶×۱۰ <sup>-۷</sup>	۳۵۰۱
۷۱/۴۲۸۷۱	۰/۹۹	۰/۹۹۹۶۲۸۱۹	۰/۰۰۰۲۲۹۸۵۳	۰/۰۰۰۱۳۹۵۲۲	۲/۰۳۱۱۶×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۰۶۳۶۹×۱۰ <sup>-۷</sup>	۸۱۵۱۹
۶۶/۶۶۶۷۹	۰/۵	۰/۹۹۸۰۳۳۵۲	۰/۰۰۰۲۲۹۷۷۸	۰/۰۰۱۷۳۳۸۴	۲/۳۹۱۹۸×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۷۸۵۴۲×۱۰ <sup>-۷</sup>	۱۲۳۳

ادامه جدول (۴-۱۰)

MTTF(سال)	SE	P <sub>I</sub>	P <sub>II</sub>	P <sub>III</sub>	P <sub>IV</sub>	P <sub>V</sub>	بازه زمانی بهینه تست دوره‌ای(ساعت)
۶۶/۶۶۶۷۹	۰/۸	۰/۹۹۸۷۱۱۷۱	۰/۰۰۰۲۲۹۸۱	۰/۰۰۱۰۵۵۷۷۴	۲/۲۳۸۵۲×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۴۷۸۵۱×۱۰ <sup>-۷</sup>	۲۱۲۳
۶۶/۶۶۶۷۹	۰/۹	۰/۹۹۹۰۵۳۹	۰/۰۰۰۲۲۹۸۲۶	۰/۰۰۰۷۱۳۶۸۱	۲/۱۶۱۱۱×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۳۲۳۶۷×۱۰ <sup>-۷</sup>	۳۳۳۷
۶۶/۶۶۶۷۹	۰/۹۹	۰/۹۹۹۶۱۹۲۵	۰/۰۰۰۲۲۹۸۵۳	۰/۰۰۰۱۴۸۴۴۸	۲/۰۳۳۱۸×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۰۶۷۸۴×۱۰ <sup>-۷</sup>	۵۹۸۶۵
۶۲/۵۰۰۱۱	۰/۵	۰/۹۹۷۹۷۲۹۷	۰/۰۰۰۲۲۹۷۷۵	۰/۰۰۱۷۹۴۳۵۶	۲/۴۰۵۶۷×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۸۱۲۹۱×۱۰ <sup>-۷</sup>	۱۱۸۸
۶۲/۵۰۰۱۱	۰/۸	۰/۹۹۸۶۷۳۳۸	۰/۰۰۰۲۲۹۸۰۸	۰/۰۰۱۰۹۴۱۲۱	۲/۲۴۷۲۲×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۴۹۵۹۷×۱۰ <sup>-۷</sup>	۲۰۴۰
۶۲/۵۰۰۱۱	۰/۹	۰/۹۹۹۰۲۶۷۲	۰/۰۰۰۲۲۹۸۲۵	۰/۰۰۰۷۴۰۸۳۲	۲/۱۶۷۲۴×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۳۳۶۰۷×۱۰ <sup>-۷</sup>	۳۱۹۳
۶۲/۵۰۰۱۱	۰/۹۹	۰/۹۹۹۶۱۰۶	۰/۰۰۰۲۲۹۸۵۲	۰/۰۰۰۱۵۷۰۸۳	۲/۰۳۵۱۳×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۰۷۱۸۵×۱۰ <sup>-۷</sup>	۴۷۶۲۸
۵۸/۸۲۳۶۲	۰/۵	۰/۹۹۷۹۱۴۳۱	۰/۰۰۰۲۲۹۷۷۲	۰/۰۰۱۸۵۳۰۰۲	۲/۴۱۸۹۴×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۸۳۹۵۶×۱۰ <sup>-۷</sup>	۱۱۴۸
۵۸/۸۲۳۶۲	۰/۸	۰/۹۹۸۶۳۶۱۹	۰/۰۰۰۲۲۹۸۰۶	۰/۰۰۱۱۳۱۲۸۷	۲/۲۵۵۶۱×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۵۱۲۹×۱۰ <sup>-۷</sup>	۱۹۶۵
۵۸/۸۲۳۶۲	۰/۹	۰/۹۹۹۰۰۰۴۳	۰/۰۰۰۲۲۹۸۲۳	۰/۰۰۰۷۶۷۱۴۷	۲/۱۷۳۲×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۳۴۸۰۸×۱۰ <sup>-۷</sup>	۳۰۶۴
۵۸/۸۲۳۶۲	۰/۹۹	۰/۹۹۹۶۰۲۲۶	۰/۰۰۰۲۲۹۸۵۲	۰/۰۰۰۱۶۵۴۵۴	۲/۰۳۷۰۳×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۰۷۵۷۴×۱۰ <sup>-۷</sup>	۳۹۷۵۳
۵۵/۵۵۵۶۴	۰/۵	۰/۹۹۷۸۵۷۳۹	۰/۰۰۰۲۲۹۷۶۹	۰/۰۰۱۹۰۹۹۴۳	۲/۴۳۱۸۳×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۸۶۵۴۴×۱۰ <sup>-۷</sup>	۱۱۱۲
۵۵/۵۵۵۶۴	۰/۸	۰/۹۹۸۶۰۰۱۳	۰/۰۰۰۲۲۹۸۰۴	۰/۰۰۱۱۶۷۳۷۳	۲/۲۶۳۷۸×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۵۲۹۳۴×۱۰ <sup>-۷</sup>	۱۸۹۸
۵۵/۵۵۵۶۴	۰/۹	۰/۹۹۸۹۷۴۸۶	۰/۰۰۰۲۲۹۸۲۲	۰/۰۰۰۷۹۲۶۹۹	۲/۱۷۸۹۸×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۳۵۹۷۵×۱۰ <sup>-۷</sup>	۲۹۴۸
۵۵/۵۵۵۶۴	۰/۹۹	۰/۹۹۹۵۹۴۰۹	۰/۰۰۰۲۲۹۸۵۱	۰/۰۰۰۱۷۳۵۸۳	۲/۰۳۸۸۷×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۰۷۹۵۳×۱۰ <sup>-۷</sup>	۳۴۲۵۳
۵۲/۶۳۱۶۶	۰/۵	۰/۹۹۷۸۰۱۹۶	۰/۰۰۰۲۲۹۷۶۷	۰/۰۰۱۹۶۵۳۱۸	۲/۴۴۴۳۶×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۸۹۰۶۱×۱۰ <sup>-۷</sup>	۱۰۷۸
۵۲/۶۳۱۶۶	۰/۸	۰/۹۹۸۵۶۵۰۲	۰/۰۰۰۲۲۹۸۰۳	۰/۰۰۱۲۰۲۴۶۹	۲/۲۷۱۷۲×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۵۴۵۳۳×۱۰ <sup>-۷</sup>	۱۸۳۷
۵۲/۶۳۱۶۶	۰/۹	۰/۹۹۸۹۵	۰/۰۰۰۲۲۹۸۲۱	۰/۰۰۰۸۱۷۵۵۲	۲/۱۸۴۶۱×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۳۷۱۱۱×۱۰ <sup>-۷</sup>	۲۸۴۴
۵۲/۶۳۱۶۶	۰/۹۹	۰/۹۹۹۵۸۶۲۲	۰/۰۰۰۲۲۹۸۵۱	۰/۰۰۰۱۸۱۴۹۱	۲/۰۴۰۶۶×۱۰ <sup>-۶</sup>	۴/۰۸۳۲۱×۱۰ <sup>-۷</sup>	۳۰۱۹۱



## فصل پنجم

جمع بندی، نتیجه گیری و پیشنهادات

## ۵-۱ | جمع‌بندی

امروزه با گسترش سیستم قدرت، اهمیت سرویس‌دهی به مصرف‌کنندگان توجه ویژه‌ای را به سمت موضوع قابلیت اطمینان سیستم قدرت جلب کرده است. یکی از راهکارهای داشتن قابلیت اطمینان مطلوب، داشتن سیستم حفاظتی با عملکرد مناسب است. برای عملکرد مناسب سیستم حفاظتی، این سیستم باید در فواصل زمانی معین تحت تست دوره‌ای قرار بگیرد. فواصل زمانی این تست برای بالا بردن شاخص‌های مطلوب و پایین آوردن شاخص‌های نامطلوب قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی باید بهینه شود. از فاکتورهای تعیین‌کننده در قابلیت اطمینان سیستم حفاظتی، نرخ خرابی آن است. هدف پژوهش ارائه شده، نشان دادن تأثیر نرخ خطای انسانی بر روی نرخ سیستم حفاظتی و به دنبال آن زمان بهینه تست دوره‌ای این سیستم بوده است. برای برآورده کردن این هدف یک مدل مارکوف ۵ حالتی برای سیستم حفاظتی خط انتقال و یک مدل مارکوف ۱۷ حالتی برای سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت پیشنهاد شده است. نرخ خرابی سیستم حفاظتی که از این مدل‌های مارکوف پیشنهادی بدست آمد، جهت بدست آوردن زمان بهینه تست دوره‌ای و شاخص‌های قابلیت اطمینان، در مدل مارکوف سیستم حفاظتی و مدل قابلیت اطمینان تجمیع شده مورد استفاده قرار گرفته و سپس نتایج حاصل از شبیه‌سازی آورده شده است.

## ۵-۲ | نتیجه‌گیری

نتایج شبیه‌سازی‌ها حاکی از آن است که با افزایش نرخ خطای انسانی،  $MTTF$  سیستم حفاظتی خط انتقال و ترانسفورماتور قدرت کاهش و نرخ خرابی این سیستم‌ها افزایش یافته و در نتیجه شاخص‌های مطلوب قابلیت اطمینان و بازه زمانی بهینه تست دوره‌ای به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابند. از نتایج قابل ملاحظه، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

• برای سیستم حفاظتی خط انتقال با افزایش نرخ خطای انسانی برای  $\lambda_{H1}$  تا  $\lambda_{H2}$  از ۰/۰۱۵ و

۰/۰۱ به ۰/۰۲۴ و ۰/۰۱۹،  $MTTF$  از ۹۹/۹۹۹۳۱۳ به ۵۲/۶۳۱۳۹ سال، کاهش می‌یابد.

- کاهش بازه زمانی تست دوره‌ای سیستم حفاظتی خط انتقال با کاهش MTTF. به عنوان مثال در ضریب اثربخشی ۹۹ درصد برای تست خودبازبینی، با کاهش MTTF از ۶۶/۶۶۶۳۶ به ۵۲/۶۳۱۳۹ ساعت، کاهش ۲۹۷۰۱ ساعتی در زمان بهینه تست دوره‌ای مشاهده می‌شود.
- با افزایش ضریب اثربخشی تست خودبازبینی خط انتقال، تأثیر افزایش نرخ خطای انسانی بر کاهش بازه زمانی تست دوره‌ای بیش‌تر است. به عنوان مثال با افزایش ضریب اثربخشی تست خودبازبینی از ۹۰٪ به ۹۹٪، تغییر بازه زمانی تست دوره‌ای از ۱۷/۳۲٪ به ۴۹/۵٪ افزایش می‌یابد.
- برای سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت با افزایش نرخ خطای انسانی برای  $\lambda_{H4}$  تا  $\lambda_{H1}$ ،  $0.1/0$  به  $0.004$ ،  $0.007$  و  $0.001$  به  $0.019$ ،  $0.016$ ،  $0.013$  و  $0.01$  MTTF از  $100/0003$  به  $52/63166$  سال، کاهش می‌یابد.
- کاهش بازه زمانی تست دوره‌ای سیستم حفاظتی ترانسفورماتور قدرت با کاهش MTTF. به عنوان مثال در ضریب اثربخشی ۹۹ درصد برای تست خودبازبینی، با کاهش MTTF از  $71/42871$  به  $52/63166$  سال، زمان بهینه تست دوره‌ای به میزان  $51328$  ساعت کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج فوق می‌توان گفت که کاهش خطای انسانی نقش بسزایی در افزایش قابلیت اطمینان و زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی تجهیزات شبکه قدرت و همچنین در کاهش هزینه‌های تعمیرات و نگهداری خواهد داشت.
- با افزایش ضریب اثربخشی تست خودبازبینی ترانسفورماتور قدرت، تأثیر افزایش نرخ خطای انسانی بر کاهش بازه زمانی تست دوره‌ای بیشتر می‌شود. با افزایش ضریب اثربخشی تست خودبازبینی از ۹۰٪ به ۹۹٪، افزایش بازه زمانی تست دوره‌ای از  $18/76$ ٪ به  $62/96$ ٪ تغییر می‌یابد.



## ۳-۵ | پیشنهادات

برای انجام مطالعات آتی در زمینه بررسی تأثیر خطای انسانی بر روی عملکرد و زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی می‌توان موارد زیر را پیشنهاد نمود.

- مدل‌سازی مسئله تعیین زمان بهینه تست دوره‌ای سیستم حفاظتی با در نظر گرفتن هزینه‌های ناشی از خطای انسانی در کنار شاخص‌های قابلیت اطمینان، به منظور کاهش خسارت ناشی از این خطاها.
- در نظر گرفتن محدودیت نیروی انسانی از نظر تعداد نیرو و مدت زمان انجام کار برای نفر-ساعت مفید برای انجام تست دوره‌ای سیستم حفاظتی به منظور کاهش نرخ خطای انسانی.

## مراجع:

- [1] G. W. E. Nieuwhof, "Human error," *Reliability engineering* vol. 6, no. 3, pp. 191-192. 1983
- [2] Review of Selected 1996 Electric System Disturbances in North America, *1996 System Disturbances*, August 2002.
- [3] R. Billinton and R.N. Allan, *Reliability Evaluation of Power Systems*, New York, Plenum, 1996.
- [4] R. Billinton and R.N. Allan, *Reliability Evaluation of Engineering Systems: Concepts and Techniques*, New York, Plenum, 1992.
- [5] Rausand M. "Reliability centered maintenance," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 60, no. 2, pp. 121-132. May 1998
- [6] Terms used by power system protection engineers, PES-TR8, July 1997 (Review 2013).
- [7] *IEEE Standard definitions for power switchgear*, IEEE Std C37.10 ,March 1992.
- [8] WSCC Relay work group report, "Installing and Maintaining Protective Relay System", July 2015.
- [9] Anderson P.M 1999, "Power system protection," IEEE press, New York, pp. 1313.
- [10] M. G. Stewart, "Modelling human error rates for human reliability analysis of a structural design task," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 36, no. 2, pp. 171-180, January 1992.
- [11] S. Viller, J. Bowers, and T. Rodden, "Human factors in requirements engineering: A survey of human sciences literature relevant to the improvement of dependable systems development processes," *Interacting with Computers*, vol. 11, no. 6, pp. 665-698, August 1999.
- [12] Mrugalska, Beata, Salman Nazir, Edwin Tytyk, and K. I. Øvergård. "Human error and response to alarms in process safety," *Dyna* , vol. 83, no. 197, pp. 81-86, May-June 2016.
- [13] M. Grozdanović, and E. Stojiljković, "Framework for human error quantification," *Facta universitatis-series: Philosophy, Sociology and Psychology*, vol. 5, no. 1, pp. 131-14, September 2006.
- [14] F. Janiček , Z. Kovács, E. Kroniak, and M. Korec "Human reliability analysis in power engineering," *Power System Operation and Control*, pp. 44-48, 2008.
- [15] Human Error Assessment & Reduction Technique (HEART). [Online]. Available: [https://www.epd.gov.hk/eia/register/report/eiareport/eia\\_2242014/EIA/app/app12.10.pdf](https://www.epd.gov.hk/eia/register/report/eiareport/eia_2242014/EIA/app/app12.10.pdf)

- [16] B. A. O. Yingkai, G. U. O. Chuangxin, J. Zhang, W. U. Jiaxin, P. A. N. G. Suhong, and Z. Zhang. "Impact analysis of human factors on power system operation reliability," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 6, no. 1, pp. 27-39, December 2016.
- [17] *IEEE Guide for Power System Protection Testing*, IEEE Std C37.233™, December 2009.
- [18] *IEEE Guide for Protective Relay Applications to Transmission Lines*, IEEE Std C37.113™, Sep 1999 (Review 2015).
- [19] D. I. Gertman, H. S. Blackman, L. N. Haney, K. S. Seidler, and H. A. Hahn, "INTENT: a method for estimating human error probabilities for decisionbased errors," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 35, no. 2, PP. 127-136, September 2007.
- [20] US.NRC. Backgrounder on the Three Mile Island Accident. *June 21, 2018*. [Online]. Available: <https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/fact-sheets/3mile-isle.html>
- [21] NASA. NASA-ST5-51L Mission Profile Retrieved. *August. 7, 2017*. [Online]. Available: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/shuttle/shuttlemissions/archives/sts-51L.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/shuttle/shuttlemissions/archives/sts-51L.html)
- [22] Encyclopædia Britannica Chernobyl Disaster, Retrieved 2019. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/event/Chernobyl-disasters>
- [23] G. E. Apostolakis, and P. P. Bansal, "Effect of human error on the availability of periodically inspected redundant systems," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 26, no. 3, pp. 220-225, July 1980.
- [24] T. P. McWilliams, and H. F. Martz, "Human error considerations in determining the optimum test interval for periodically inspected standby systems," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 29, no. 4, pp. 305-310, November 1980.
- [25] W. B. Johnson, and W. B. Rouse, "Analysis and classification of human errors in troubleshooting live aircraft power plants," *IEEE Transactions on Systems, Man, & Cybernetics*, vol. 12, no. 3, pp. 389-393, May 1982.
- [26] B. S. Dhillon "System reliability evaluation models with human error," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 32, no. 1, pp. 47-47, April 1983.
- [27] B. S. Dhillon, and R. B. Misra, "Effect of critical human error on system reliability," *Reliability engineering*, vol. 12, no. 1, pp. 17-33, January 1985.
- [28] J. C. Williams, and J. Willey, "Quantification of human error in maintenance for process plant probabilistic risk assessment," In *Proceedings of a Symposium on The Assessment and Control of Major Hazards*, vol. 93, pp. 353-366.
- [29] W. T. Ming, and S. L. Hwang, "Maintenance error reduction strategies in nuclear power plants, using root cause analysis," *Applied ergonomics*, vol. 20, no. 2, pp. 115-121, June 1989.
- [30] G. Basra, and B. Kirwan, "Collection of offshore human error probability data," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 61, no. 1-2, pp. 77-93, August 1998.

- [31] H. P. Hong, and W. X. He, "Effect of human error on the reliability of roof panel under uplift wind pressure," *Structural Safety*, vol. 52, no. A, pp. 54-65, January 2015.
- [32] M. Kishani, R. Eftekhari, and H. Asadi, "Evaluating impact of human errors on the availability of data storage systems," *European Design and Automation Association*, vol. pp. 314-317, March 2017.
- [33] M. A. Sheikh, N. M. Nor. T. Ibrahim, S. T. Bakhsh, M. Irfan, and N. B. Saad, "An Intelligent Automated Method to Diagnose and Segregate Induction Motor Faults," *Journal of Electrical Systems*, vol. 13, no. 2, pp. 241-254, June 2017.
- [34] P.P Molebe, B. S. Makhanya, and J. H. C. Pretorius, "The Reliability and Maintainability Analysis of Transmission Transformers in South Africa," In *IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe IEEEIC/I&CPS Europe*, pp. 1-5, June 2018.
- [35] P. P. Gupta, and A. Kumar "Reliability and MTTF analysis of a non repairable parallel redundant complex system under hardware and human failures," *Microelectronics Reliability*, vol. 26, no. 2, pp. 229-234, January 1987.
- [36] J. J. Kumm, M. S. Weber, D. Hou, and E. O. Schweitzer, "Predicting the optimum routine test interval for protective relays," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 10, no. 2, pp. 659-665, April 1995.
- [37] K. Kangvansaichol, P. Pittayapat, and B. Eua-Arporn, "Routine test interval decision for protective systems based on probabilistic approach," *IEEE. International Conference on Power System Technology*, vol. 2, pp. 977-982, December 2000.
- [38] K. Kangvansaichol, P. Pittayapat, and B. Eua-Arporn, "Optimal routine test intervals for pilot protection schemes using probabilistic methods," *IET. 7<sup>th</sup> International Conference on Developments in Power Systems Protection.*, pp. 254-257, February 2001.
- [39] R. Billinton, M. Fotuhi-Firuzabad, and T. S. Sidhu, "Determination of the optimum routine test and self-checking intervals in protective relaying using a reliability model," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 17, no. 3, pp. 663-669, November 2002.
- [40] H. Seyedi, M. Fotuhi, and M. Sanaye-Pasand, "An extended Markov model to determine the reliability of protective system," *IEEE Power India Conference*, pp. 1-5. April 2006.
- [41] A. Abbarin, and M. Fotuhi-Firuzabad, "Evaluation of redundancy and effect of protective components on protection system reliability" *5<sup>th</sup> International Conference on Electrical and Electronics Engineering*, pp. 5-9, December 2007.
- [42] Y. Damchi, and J. Sadeh, "Considering failure probability for back-up relay in determination of the optimum routine test interval in protective system using Markov model," *IEEE Power & Energy Society General Meeting, PES'09*, pp. 1-5, July 2009.

- [43] A. Abbarin, and M. Fotuhi-Firuzabad, "A novel routine test schedule for protective systems using an extended component-based reliability model," *International Conference On Electrical and Electronics Engineering, ELECO.*, pp. I-97-I-102, November 2009.
- [44] Y. Damchi, and J. Sadeh, "Effect of monitoring and self-checking tests effectiveness indice of back-up protection system on the optimum routine and self-checking test intervals of protection system," *Advanced Power System Automation and Protection APAP, International Conference*, vol. 2 , pp. 1367-1372, October 2011.
- [45] A. H. Etemadi, and M. Fotuhi-Firuzabad, "Design and routine test optimization of modern protection systems with reliability and economic constraints," *IEEE Transactions on power delivery*, vol. 27, no. 1, pp. 271-278, November 2011.
- [46] Y. Damchi, and J. Sadeh, "Determination of the optimum routine and selfchecking test time intervals for power system protection considering remote back-up protection system failure," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 7, no. 10, pp. 1163-1171, October 2013.
- [47] H. Lei, and C. Singh, "Incorporating protection systems into composite power system reliability assessment," *IEEE. Power & Energy Society General Meeting*, pp. 1-5, July 2015.
- [48] J. Jedrzejczak, and G. J. Anders, "Transition Rates Assessment of Protective Relay Reliability Models With Incomplete Data," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 32, no. 1, pp. 809-816, May 2016.
- [49] S. Ghosh, D. Ghosh, and M. D. Kur, "Situational Awareness Enhancement of Smart Grids Using Intelligent Maintenance Scheduling of Phasor Measurement Sensors," *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, no. 23, pp. 7685-7693, June 2017.
- [50] E. L. Kokorin, and S. A. Dmitriev, "Maintenance of protective relays" 2017 IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University RTUCON., pp. 1-5, October 2017.
- [51] R. He, D. Jianhua, and L. Lei. Lai, "Reliability evaluation of communication-constrained protection systems using stochastic-flow network models," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 2371-2381, July 2018.



## **Abstract**

Today, with the growth and development of the power grid, the continuity of service to consumers and the reduction of grid outages are of paramount importance and are one of the goals of power grid engineers. Maintaining the reliability of the power system at the optimal level is one effective factor among factors that can meet these goals. One way to increase network reliability is to use a high-performance protection system. In order to have a well-functioning protection system, this system must be evaluated routinely by a routine test, because this test reduces relay misoperation or relay false-operation causing by failures that happen in a relay. the failure rate of the relays is one of the effective factors in determining the time interval of routine test. Human error is one of the factors which can play a significant role in changing the failure rate of the protection system.

Based on the above explanation, in this thesis, the impact of human error on the optimal time interval of routine test and reliability of the protection system is being investigated using a Markov model. To reach this goal, a 5-States Markov model for a transmission line and a 17-States Markov model for power transformer is being proposed. A tip that should be mention here is, the proposed viewpoint for modeling the impact of human error on the protective system is possible for implementation for any protective system. According to the simulation results, the human error affects significantly on increasing the failure rate of protection systems and, consequently, reducing MTTF and optimal time interval of routine test of the protection system.

**Keywords:** Human error, Failure rate of protection system, Reliability, Markov model, Optimum routine test interval



**Shahrood University Of Technology**

**Impact Of Human Error On The Optimum  
Time Interval Of Routine Test Of Protection  
System**

By:

**Armin Mirsamadi**

Supervisors:

**Dr. Mohsen Assili**

**Dr. Yaser Damchi**

January 2020