

# طراحی سیستم‌های اتکاپذیر دکتر زرندی



**دانشگاه صنعتی امیرکبیر**  
( پلی تکنیک تهران )  
دانشکده مهندسی کامپیوتر

رضا آدینه پور ۴۰۲۱۳۱۰۵۵

تمرین سری سوم  
افزونگی

۳ آبان ۱۴۰۳



دانشکده مهندسی کامپیوتر

# طراحی سیستم‌های اتکاپذیر

تمرین سری سوم  
افزونی

رضا آدینه پور ۴۰۲۱۳۱۰۵۵

## سوال اول

مداری منطقی با ۳۲۰۰ خط دارای ۲۰ خطای stuck-at غیرقابل تشخیص است. مجموعه آزمونی که برای تست تولید این مدار طراحی شده است، قادر به شناسایی ۶۲۵۲ خطای stuck-at تک‌خطی در مدار می‌باشد. بررسی کنید که آیا پوشش خطاهای حاصل‌شده، به حد نصاب صنعتی ۹۹٪ پوشش شناسایی خطاهای قابل تشخیص می‌رسد یا خیر.

پاسخ

از آنجا که برای هر خط دو خطای ممکن stuck-at-0 و stuck-at-1 می‌تواند رخ دهد، تعداد کل خطاهای ممکن در مدار ۶۴۰۰ است. پوشش شناسایی خطاهای قابل تشخیص به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C = \frac{\text{تعداد خطاهای تشخیص داده شده}}{\text{تعداد خطاهای قابل تشخیص}} = \frac{6252}{6400 - 20} = 0.9799$$

بنابر این طبق مقدار به‌دست آمده، می‌توان نتیجه گرفت که مجموعه آزمونی که برای تست تولید این مدار طراحی شده است، با حدنصاب صنعتی تطابق ندارد.

## سوال دوم

پنج مثال از کاربردهایی ارائه دهید که در آن‌ها استفاده از افزونگی «آماده‌به‌کار سرد» و «آماده‌به‌کار گرم» را توصیه می‌کنید. پاسخ خود را با دلایل مناسب توجیه کنید.

پاسخ

• مثال‌های آماده به کار گرم:

۱. سیستم‌های مخابراتی حیاتی: در شبکه‌های مخابراتی که توقف سیستم ممکن است منجر به قطعی‌های بزرگ و اختلالات گسترده در ارتباطات شود، استفاده از «آماده‌به‌کار گرم» ترجیح داده می‌شود. در این سیستم‌ها، تجهیزات یدکی همیشه در حالت فعال هستند و در صورت خرابی بلافاصله می‌توانند جایگزین شوند، بنابراین زمان خرابی به حداقل می‌رسد.
۲. سرورهای بانکداری و مالی: در سرورهای مالی که عملیات لحظه‌ای و پیوسته از اهمیت بالایی برخوردار است، از افزونگی «آماده‌به‌کار گرم» استفاده می‌شود. به دلیل اهمیت بالای حفظ داده‌ها و جلوگیری از توقف خدمات، سرورها همیشه آماده هستند تا در صورت خرابی سرور اصلی، بدون تأخیر به کار گرفته شوند. در این سیستم‌ها، زمان خرابی نباید وجود داشته باشد.

## پاسخ

۳. مراکز داده حیاتی: در مراکز داده‌ای که داده‌ها به صورت لحظه‌ای پردازش می‌شوند و از دست رفتن حتی چند ثانیه اطلاعات می‌تواند خسارات زیادی به بار آورد، استفاده از «آماده‌به‌کار گرم» توصیه می‌شود. در این سیستم‌ها، هرگونه اختلال در عملکرد سرورها می‌تواند با تغییر سریع به سرور یدکی جلوگیری شود تا عملکرد مداوم سیستم تضمین گردد.

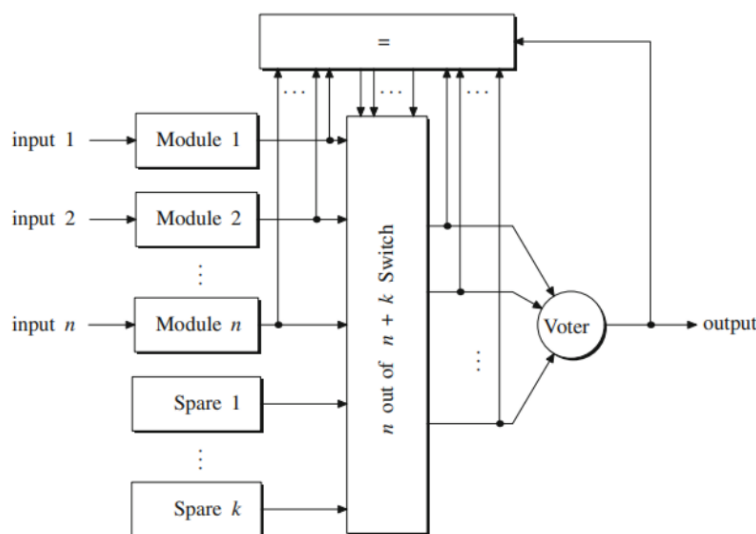
## • مثال‌های آماده به کار سرد:

۱. سیستم‌های کنترل صنعتی: در سیستم‌های کنترل صنعتی مانند کارخانه‌های تولیدی، که عملیات به طور متناوب انجام می‌شود و نیازی به عملکرد بی‌وقفه نیست، از «آماده‌به‌کار سرد» استفاده می‌شود. در این حالت، سیستم یدکی تنها در صورت خرابی سیستم اصلی فعال می‌شود. این رویکرد مقرون به صرفه است و هزینه‌های انرژی را کاهش می‌دهد.

۲. سیستم‌های ماهواره‌ای: در سیستم‌های ماهواره‌ای، مصرف انرژی بسیار اهمیت دارد. به دلیل محدودیت‌های انرژی در فضا، استفاده از افزونگی «آماده‌به‌کار سرد» توصیه می‌شود. در این حالت، تجهیزات یدکی در حالت خاموش قرار می‌گیرند و فقط در صورت خرابی تجهیزات اصلی فعال می‌شوند. این رویکرد باعث صرفه‌جویی در انرژی می‌شود، هرچند زمان بیشتری برای فعال‌سازی یدک نیاز است.

## سوال سوم

فرض کنید که در افزونگی  $N$ -ماژوله (NMR)، رأی‌دهنده اکثریتی را با  $k$  ماژول دیگری (شکل زیر) جایگزین کنیم و به جای آن از یک رأی‌دهنده آستانه‌ای (Threshold voter) مشابه با آنچه در افزونگی خودپالاینده (Self purging) استفاده می‌شود، بهره ببریم. در این حالت، تشخیص‌دهنده اختلاف (Disagreement detector) پس از اتمام ماژول‌های بدکی غیرفعال نمی‌شود. سیستم به عنوان یک سیستم NMR غیرفعال به کار خود ادامه می‌دهد و تشخیص‌دهنده اختلاف به مقایسه خروجی رأی‌دهنده با خروجی‌های هر یک از ماژول‌ها ادامه می‌دهد تا ماژول‌های معیوب را شناسایی کند. زمانی که ماژول معیوب شناسایی شد، با تنظیم وزن آن به صفر، از فرایند رأی‌گیری حذف می‌شود. در چنین سیستمی چند خطای ماژول می‌تواند تحمل شود؟



## پاسخ

در NMR معمولی، چندین ماژول افزونه ورودی‌های یکسان را پردازش می‌کنند و یک رأی‌گیر اکثریت خروجی را انتخاب می‌کند. زمانی که خطا رخ می‌دهد، ماژول‌های یدکی جایگزین ماژول‌های خراب می‌شوند تا قابلیت اطمینان سیستم حفظ شود. این سیستم می‌تواند تا  $\lfloor \frac{N-1}{2} \rfloor$  خطا را تحمل کند. یعنی اگر تعداد  $N$  ماژول داشته باشیم، تا  $\frac{N}{2}$  ماژول می‌توانند معیوب شوند و سیستم همچنان به درستی کار کند.

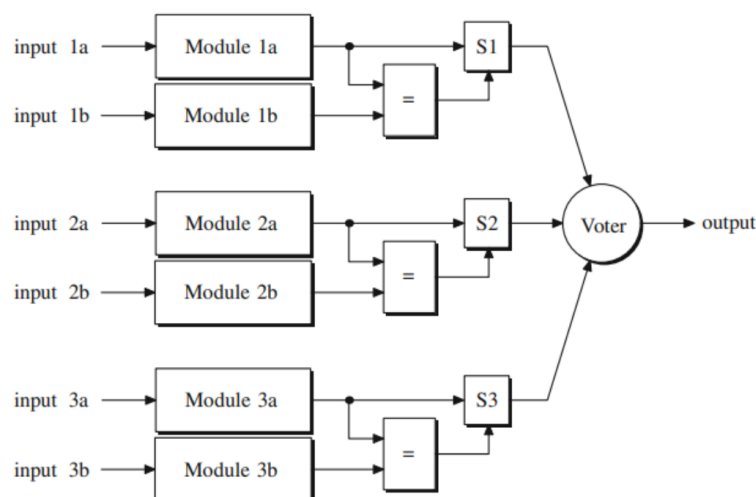
در طراحی اصلاح شده، رأی‌گیر اکثریت با رأی‌گیر آستانه‌ای جایگزین شده است که بر اساس مقایسه خروجی ماژول‌ها با یک آستانه از پیش تعیین شده عمل می‌کند، نه صرفاً بر اساس قانون اکثریت. سیستم همچنین شامل یک آشکارساز اختلاف است که حتی پس از استفاده از تمام ماژول‌های یدکی، همچنان به شناسایی ماژول‌های خراب ادامه می‌دهد.

در این سیستم، با استفاده از رأی‌دهنده آستانه‌ای، ماژول‌های معیوب شناسایی شده و با تنظیم وزن آن‌ها به صفر، از فرآیند رأی‌گیری حذف می‌شوند. بنابراین، تا زمانی که تعداد ماژول‌های سالم بیشتر از تعداد معیوب باشد، سیستم می‌تواند به کار خود ادامه دهد.

در چنین سیستمی، با رأی‌دهنده آستانه‌ای، سیستم می‌تواند تا  $N - 1$  خطا را تحمل کند، زیرا ماژول‌های معیوب حذف می‌شوند و سیستم به صورت غیرفعال به کار خود ادامه می‌دهد. به عبارتی، سیستم قادر است تا زمانی که حداقل یک ماژول سالم باقی بماند، کار کند.

## سوال چهارم

پیکربندی نشان داده شده در شکل زیر به نام افزونی سه‌گانه-دوگانه (triple-duplex redundancy) شناخته می‌شود. در این پیکربندی، شش ماژول یکسان که در سه جفت گروه‌بندی شده‌اند، به صورت موازی عمل می‌کنند. در هر جفت، نتایج محاسبات با استفاده از یک مقایسه‌گر مقایسه می‌شود. اگر نتایج همخوانی داشته باشند، خروجی مقایسه‌گر در رأی‌گیری شرکت می‌کند. در غیر این صورت، جفت ماژول‌ها معیوب اعلام شده و سوئیچ آن‌ها را از سیستم حذف می‌کند. یک رأی‌دهنده آستانه‌ای که قادر به تطبیق با کاهش تعداد ورودی‌ها است، استفاده می‌شود. زمانی که اولین جفت دوگانه از رأی‌گیری حذف می‌شود، به عنوان یک مقایسه‌گر عمل می‌کند. وقتی که جفت دوم حذف می‌شود، سیگنال ورودی خود را مستقیماً به خروجی منتقل می‌کند. چنین پیکربندی چند خطای ماژول را می‌تواند تحمل کند؟



## پاسخ

در پیکربندی افزونگی سه‌گانه-دوگانه (triple-duplex redundancy)، ما شش ماژول داریم که در سه جفت (duplex) دسته‌بندی شده‌اند و با یکدیگر موازی کار می‌کنند. به بیان ساده‌تر، سه جفت ماژول داریم و هر جفت شامل دو ماژول است که خروجی‌هایشان با هم مقایسه می‌شوند. اگر نتایج یکسان باشند، خروجی آن جفت به عنوان ورودی برای رأی‌دهنده مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر نتایج متفاوت باشند، جفت ماژول‌های معیوب حذف می‌شوند و دیگر در رأی‌گیری شرکت نمی‌کنند.

۱. مرحله اول: اگر هیچ یک از ماژول‌ها معیوب نباشند، هر سه جفت خروجی‌های خود را به رأی‌دهنده می‌فرستند و رأی‌دهنده آستانه‌ای تصمیم‌گیری را بر اساس سه ورودی انجام می‌دهد.

۲. مرحله دوم: اگر یک جفت ماژول معیوب شود، جفت معیوب از رأی‌گیری حذف می‌شود. در این حالت، دو جفت باقی‌مانده خروجی‌های خود را به رأی‌دهنده می‌فرستند و رأی‌دهنده همچنان می‌تواند با دو ورودی درست کار کند.

۳. مرحله سوم: اگر جفت دوم نیز معیوب شود، تنها یک جفت سالم باقی می‌ماند. در این وضعیت، رأی‌دهنده آستانه‌ای مستقیماً از خروجی جفت سالم استفاده می‌کند و آن را به عنوان خروجی نهایی سیستم انتخاب می‌کند.

در نتیجه در این پیکربندی، سیستم می‌تواند تا ۲ خطای ماژول را تحمل کند، یعنی اگر دو جفت (چهار ماژول) معیوب شوند، سیستم همچنان قادر به کار خواهد بود. به این ترتیب، سیستم قادر است تا زمانی که حداقل یک جفت سالم باقی بماند (۲ ماژول سالم)، کار کند. به‌طور کلی می‌توان گفت پیکربندی افزونگی سه‌گانه-دوگانه می‌تواند تا ۲ جفت (یا ۴ ماژول) معیوب را تحمل کند و همچنان به درستی عمل کند.

## سوال پنجم

با استفاده از ChatGPT ویا هر مدل زبانی دیگر، یک روش افزونگی سخت‌افزاری جدید پیشنهاد دهید.

## پاسخ

افزونگی سخت‌افزاری معمولاً از سیستم‌های چندماژوله‌ای استفاده می‌کند که در آن‌ها ماژول‌های مشابه به صورت موازی عمل می‌کنند و از یک رأی‌دهنده اکثریتی یا آستانه‌ای برای انتخاب خروجی نهایی استفاده می‌شود. در این مقاله، یک روش افزونگی جدید مبتنی بر یادگیری ماشین پیشنهاد می‌شود که از یک مدل یادگیری ماشین برای تشخیص و پیش‌بینی خرابی‌های ماژول‌ها استفاده می‌کند.

## ۱. شرح روش پیشنهادی

روش پیشنهادی شامل ترکیبی از افزونگی  $N$ -ماژوله و یک مدل یادگیری ماشین برای تحلیل خروجی‌های ماژول‌ها و پیش‌بینی خرابی‌های بالقوه است. در این سیستم:

- $N$  ماژول پردازشی به صورت موازی عمل می‌کنند و خروجی‌های مشابهی تولید می‌کنند.
- به جای استفاده از یک رأی‌دهنده اکثریتی یا آستانه‌ای، از یک مدل یادگیری ماشین برای تحلیل خروجی‌های ماژول‌ها و شناسایی ناهنجاری‌ها استفاده می‌شود.
- مدل یادگیری ماشین به صورت مداوم داده‌های خروجی هر ماژول را تحلیل می‌کند و می‌تواند خرابی‌های احتمالی را پیش‌بینی کند.

## پاسخ

- سیستم به طور خودکار ماژول‌های معیوب را از فرآیند رأی‌گیری حذف کرده و ماژول‌های سالم را برای ادامه کار انتخاب می‌کند.

## ۲. مراحل عملکرد سیستم

- جمع‌آوری داده‌ها:** سیستم از تمام ماژول‌های ماژوله-N داده‌های خروجی را جمع‌آوری کرده و مقایسه می‌کند.
- تحلیل خروجی:** مدل یادگیری ماشین، خروجی‌ها را تحلیل کرده و به دنبال الگوهای غیرعادی می‌گردد.
- پیش‌بینی خرابی:** با استفاده از تحلیل داده‌های گذشته، مدل یادگیری ماشین احتمال خرابی ماژول‌های مختلف را پیش‌بینی می‌کند.
- تصمیم‌گیری نهایی:** سیستم بر اساس داده‌های موجود و خروجی ماژول‌های سالم، تصمیم نهایی را با استفاده از رأی‌دهنده یا مستقیماً از مدل یادگیری ماشین اتخاذ می‌کند.

## ۳. مزایای روش پیشنهادی

- پیش‌بینی خرابی:** سیستم می‌تواند خرابی‌های آینده ماژول‌ها را پیش‌بینی کند و از خرابی‌های بزرگ‌تر جلوگیری کند.
- خوداصلاحی:** سیستم به صورت خودکار ماژول‌های معیوب را از فرآیند حذف می‌کند و باعث افزایش پایداری می‌شود.
- تطبیق‌پذیری:** مدل یادگیری ماشین به مرور زمان رفتار ماژول‌ها را بهتر می‌شناسد و توانایی تطبیق‌پذیری بالاتری دارد.

## ۴. چالش‌های روش پیشنهادی

- پیچیدگی پیاده‌سازی:** استفاده از یادگیری ماشین در افزونگی سخت‌افزاری پیچیدگی سیستم را افزایش می‌دهد.
- زمان آموزش:** مدل یادگیری ماشین نیاز به زمان و داده‌های کافی برای آموزش صحیح دارد.

## ۵. نتیجه‌گیری

روش افزونگی سخت‌افزاری پیشنهادی با استفاده از مدل‌های یادگیری ماشین، قابلیت پیش‌بینی خرابی‌های ماژول‌ها و تحلیل رفتار آن‌ها در زمان واقعی را دارد. این روش به طور قابل توجهی پایداری سیستم‌های افزونگی را افزایش داده و می‌تواند در کاربردهای حیاتی که نیاز به اطمینان بالا دارند، مورد استفاده قرار گیرد.

## سوال ششم

کنترل‌کننده یک فرآیند شیمیایی دارای قابلیت اطمینان معادل  $0.997$  است. به دلیل پایین بودن این قابلیت اطمینان، تصمیم گرفته شده که کنترل‌کننده تکرار شود. مهندس طراح باید بین پیکربندی افزونگی موازی و پیکربندی آماده‌به‌کار سرد یکی را انتخاب کند. پوشش تشخیص خرابی (Fault Detection) باید چقدر باشد تا پیکربندی آماده‌به‌کار سرد از پیکربندی موازی قابل اطمینان‌تر باشد؟ برای پیکربندی افزونگی آماده‌به‌کار سرد، فرض کنید که واحدهای Fault Detection و سوئیچ نمی‌توانند خراب شوند و کنترل‌کننده یدکی در حالت آماده‌به‌کار خراب نخواهند شد. در هیچ‌یک از پیکربندی‌ها تعمیرات مجاز نیستند.

## ۱. محاسبه قابلیت اطمینان پیکربندی موازی

در پیکربندی افزونگی موازی، دو کنترل‌کننده به صورت همزمان فعال هستند. اگر حداقل یکی از کنترل‌کننده‌ها درست کار کند، سیستم به درستی عمل می‌کند. بنابراین، قابلیت اطمینان پیکربندی موازی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R_{parallel} = 1 - (1 - R)^2$$

با جایگذاری  $R = 0.97$ :

$$R_{parallel} = 1 - (1 - 0.97)^2 = 1 - 0.03^2 = 1 - 0.0009 = 0.9991$$

بنابراین، قابلیت اطمینان پیکربندی موازی برابر با 0.9991 است.

## ۲. محاسبه قابلیت اطمینان پیکربندی آماده‌به‌کار سرد

در پیکربندی آماده‌به‌کار سرد، کنترل‌کننده یدکی تنها در صورت خرابی کنترل‌کننده اصلی و تشخیص موفق خرابی فعال می‌شود. قابلیت اطمینان پیکربندی آماده‌به‌کار سرد به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$R_{standby} = R + C_f \times (1 - R)$$

با جایگذاری  $R = 0.97$ :

$$R_{standby} = 0.97 + C_f \times (1 - 0.97) = 0.97 + 0.03 \times C_f$$

## ۳. شرط قابل اطمینان‌تر بودن پیکربندی آماده‌به‌کار سرد

برای اینکه پیکربندی آماده‌به‌کار سرد از پیکربندی موازی قابل اطمینان‌تر باشد، باید داشته باشیم:

$$R_{standby} > R_{parallel}$$

با جایگذاری مقادیر:

$$0.97 + 0.03 \times C_f > 0.9991$$

حل این معادله:

$$0.03 \times C_f > 0.9991 - 0.97$$

$$0.03 \times C_f > 0.0291$$

$$C_f > \frac{0.0291}{0.03} = 0.97$$

پاسخ

برای اینکه پیکربندی آماده‌به‌کار سرد از پیکربندی موازی قابل اطمینان‌تر باشد، پوشش تشخیص خرابی باید حداقل برابر با ۹۷ درصد باشد.

پایان تمرین سری سوم  
افزونگی