

ارائه راهکاری برای بهبود عملکرد روش تولید آلام متعارف رست در سیستم‌های صنعتی

ایوب ولی پوری^۱*

دانشجوی دکترا

غلامرضا لطیف شبگاهی^۲

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

سیستم‌های آلام نقش مهمی در حفظ ایمنی و جلوگیری از وقوع حوادث در سیستم‌های صنعتی بر عهده دارند. این سیستم‌ها با استفاده از متغیرهای آلام، وضعیت‌های نامطلوب و عیوب سیستم را تشخیص؛ و با صدور آلام به اپراتور اعلام می‌کنند. تایمر تأخیری یکی از روش‌های مؤثر و پرکاربرد در کاهش آلام‌های نادرست است که در سال‌های اخیر توجه محققان زیادی را به خود جلب کرده است. متداول‌ترین روش مبتنی بر تایمرهای تأخیری، روش رست است که در صنایع کاربرد فراوانی دارد. تحقیقات نشان می‌دهد که کارایی این روش در مواجهه با متغیرهای آلام با توزیع ناشناخته با چالش جدی مواجه است بطوری که این روش اصولاً قادر به مواجهه با متغیرهای با توزیع آمیخته نیست. در این مقاله راهکاری ارائه می‌شود که کارایی این روش را در مواجهه با متغیرهای با توزیع ناشناخته بهبود می‌دهد. راهکار ارائه شده تشریح شده و اثرات اعمال آن روی روش رست بررسی و گزارش می‌شود.

لغات کلیدی: مدیریت آلام، تابع توزیع نامتعارف، تایمر تأخیری، آلام ازدست‌رفته، آلام نادرست

۱-مقدمه

امروزه سیستم‌های تشخیص عیب و مدیریت آلام از اجزای لاینفک سیستم‌های صنعتی مدرن هستند. آمارها نشان می‌دهد که اتفاقات و خطاهای ناخواسته، وقوع عیب در تجهیزات و خاموشی‌های ناگهانی و برنامه‌ریزی نشده، سالانه میلیاردها دلار به واحدهای صنعتی صدمه وارد می‌کنند (سو و همکاران^۳، ۲۰۱۸). این اتفاقات از عوامل گوناگونی نظیر آسیب‌های جزئی در تجهیزات، تنظیم نامناسب کنترل‌کننده‌ها، انتخاب نامناسب نقاط تنظیم و ... ناشی می‌شوند (تجهیزات، سیستم و انجمن توماسیون^۴). معمولاً برای جلوگیری از این مشکلات و بهبود کیفیت محصولات، عملکرد بخش‌های مختلف یک واحد صنعتی پایش و کنترل می‌شود. یک سیستم آلام به‌عنوان قسمتی از یک سیستم پایش و نظارت، مجموعه‌ای از سخت‌افزارها و نرم‌افزارها است که براساس یک سری استانداردها (ایموا^۵) در تولید و مدیریت آلام، در تشخیص به‌موقع خطاهای رخ داده در قسمت‌های مختلف یک واحد صنعتی کمک می‌کنند. در ارتباط با سیستم‌های آلام چندین استاندارد از جمله EEMUA 191 و ISA S18.02 وجود دارد. سیستم‌های آلام با پردازش نمونه‌های متغیر آلام (متغیر فرایندی که غیرنرمال شدن عملکرد سیستم، در رفتار آن به خوبی نمود پیدا می‌کند) سیگنال آلام را تولید می‌کنند. یک سیستم آلام کارآمد باید ویژگی‌های زیر را داشته باشد.

- صدور کمترین آلام اشتباه در شرایط عملکردی نرمال
- صدور آلام به صورت پیوسته در شرایط عملکردی غیرنرمال
- صدور آلام در کمترین زمان بعد از غیرنرمال شدن عملکرد سیستم

¹ A_Valipoori@sbu.ac.ir

² gh_latif@sbu.ac.ir

³ Su

⁴ Instrumentation, Systems and Automation Society

⁵ EEMUA

ویژگی‌های فوق در سیستم‌های آلامر توسط سه شاخص نرخ آلامرهای اشتباه (FAR_1)، نرخ آلامرهای گم‌شده (MAR_2)، میانگین تأخیر آلامر (AAD_3) اندازه‌گیری می‌شوند. شاخص‌های FAR و MAR دقت سیستم و شاخص AAD بازدهی سیستم آلامر را نشان می‌دهند. سازماندهی این مقاله به صورت زیر می‌باشد. بعد از بیان مقدمه‌ی موضوع، در بخش دوم کارهای قبلی و در بخش سوم تابع توزیع آمیخته مرور می‌گردد. بخش چهارم، روش تولید آلامر مبتنی بر تایمر تأخیری با n نمونه تأخیر را بیان و کارایی آن برای متغیرهای آلامر غیرمتعارف را بررسی می‌کند. در بخش پنجم راهکار پیشنهادی برای بهبود عملکرد سیستم آلامر مذکور در مقابله با توزیع‌های نامتعارف ذکر می‌گردد. نتایج حاصل از اعمال راهکار پیشنهادی روی کارایی سیستم آلامر مربوطه در بخش ششم نشان داده می‌شود و در نهایت در بخش هفتم جمع‌بندی مقاله صورت می‌پذیرد.

۲-مروری بر مطالعات صورت گرفته

سیستم‌های آلامر را می‌توان براساس روش مورد استفاده برای تولید آلامر، دسته‌بندی کرد. بر این اساس در صنعت غالباً از سه دسته‌ی تایمرهای تأخیری، باندهای مرده و فیلترها استفاده می‌شود. تایمرهای تأخیری از پرکاربردترین و موثرترین روش‌ها در کاهش آلامرهای نادرست می‌باشند که در سال‌های اخیر، توجه محققان زیادی را به خود جلب کرده‌اند. روش متداول تایمر تأخیری با نام " n - sample on/off delay timer" شناخته می‌شود. در این روش، در شرایطی که آلامر خاموش/روشن باشد در صورتی که n نمونه‌ی پایایی از متغیر آلامر، بالاتر/پایین‌تر از آستانه‌ی از پیش تعریف‌شده‌ی قرار بگیرند، آلامر صادر/قطع می‌شود. در کارهای انجام شده توسط ایزدی و همکاران (۲۰۰۹)، ادنان و همکاران^۴ (۲۰۱۱)، کنداویتی و همکاران^۵ (۲۰۱۱) و زو و همکاران^۶ (۲۰۱۱) پروسه‌هایی برای طراحی یک سیستم آلامر براساس این روش ارائه شده است که در آنها پارامترهای طراحی سیستم آلامر، به منظور بهینه کردن کارایی آن، تعیین می‌شوند. در مطالعه انجام شده توسط ادنان و همکاران (۲۰۱۳) یک تعمیم از تایمرهای تأخیری با نام " m out of n delay timer" معرفی گردیده است. در این روش، در شرایطی که آلامر خاموش/روشن باشد، اگر از بین n نمونه‌ی متوالی، حداقل m نمونه بالاتر/پایین‌تر از آستانه قرار بگیرند آلامر صادر/قطع می‌شود. در مطالعات زنگ و همکاران^۷ (۲۰۱۷) و لین و همکاران^۸ (۲۰۱۸) روابطی برای محاسبه‌ی شاخص‌های FAR ، MAR و AAD برای این روش ارائه کرده‌اند. حیدری و ایزدی (۲۰۱۹) خطایی که در انجام محاسبات مربوط به شاخص‌های FAR و MAR برای حالت 3 out of 4 در مطالعه زنگ و همکاران (۲۰۱۷) انجام گرفته بود را مشخص و اصلاح کردند. طاهری و همکاران (۱۳۹۵) نیز یک تعمیم دیگر از تایمرهای تأخیری با نام " $Penalty$ " ارائه شده است که دارای ۳ پارامتر طراحی، n (تعداد تأخیر)، i (پارامتر پناستی) و آستانه می‌باشد. این روش شامل یک شمارنده نیز می‌باشد. در شرایطی که آلامر خاموش/روشن است اگر یک نمونه از متغیر آلامر بالاتر/پایین‌تر از آستانه باشد، شمارنده با یک جمع می‌شود و اگر یک نمونه پایین‌تر/بالاتر از آستانه باشد به اندازه‌ی i از آن کم می‌شود. در این شرایط اگر شمارنده به مقدار n برسد آلامر صادر/قطع می‌شود. طاهری- کلانی و همکاران (۲۰۱۸) روابطی برای محاسبه‌ی شاخص‌های ارزیابی این روش ارائه داده است. زانگ و همکاران (۲۰۱۵) و طاهری و همکاران (۱۳۹۸) به منظور بهبود شاخص AAD ، روش‌های چندآستانه‌ای را پیشنهاد کرده‌اند. این روش‌ها تعمیم‌هایی از n - sample on/off delay timer می‌باشند که در آن‌ها با توجه به جایگاه نمونه‌ی متغیر آلامر نسبت به آستانه‌ها مقدار n تغییر می‌کند. کاسد و همکاران^۹ (۲۰۱۹) یک تعمیم از روش تایمرهای تأخیری با نام modified generalized delay-timer ارائه شده است که در واقع روش تایمر تأخیری m out of n چند آستانه‌ای است. افضل و چن^{۱۰} (۲۰۱۷)، تولسیان و همکاران^{۱۱} (۲۰۱۸)، اصلان صفت و

1 False Alarm Rate

2 Missed Alarm Rate

3 Average Alarm Delay

4 Adnan

5 Kondavitee

6 Xu

7 Zeng

8 Lin

9 Kaced

10 Afzal and chen

11 Tulsyan

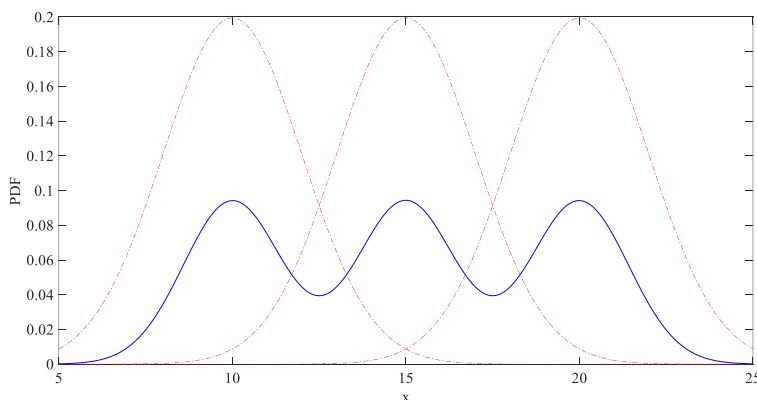
همکاران (۲۰۲۰) و محمدزاده و همکاران (۱۳۹۸) نیز کارهای مشابه دیگری در حوزه‌ی تایمرهای تأخیری انجام گرفته است. هر کدام از مراجع فوق به یکی از چالش‌های موجود در حوزه‌ی تایمرهای تأخیری پرداخته است. بررسی‌های ما نشان می‌دهد که این سیستم‌ها هنوز با چالش‌های جدی دیگری مواجه هستند که در زیر به سه مورد اشاره می‌شود.

- این سیستم‌ها در مواجهه با عیوبی که منجر به تغییر واریانس متغیر آلام می‌شوند با چالش مواجه می‌شوند.
- در مواردی که عیب رفتار متغیر آلام را به نحوی تغییر می‌دهد که با یک آستانه‌ی منفرد قابل تشخیص نیست، این سیستم‌ها با چالش مواجه‌اند.
- این سیستم‌ها در مواجهه با متغیرهای آلامی که رفتار پیچیده‌ای دارند و توزیع آنها قبل یا بعد از وقوع عیب آمیخته باشند، با چالش مواجه می‌شوند.

نکته‌ای که باید به آن توجه کرد این است که حل چالش سوم، منجر به حل چالش‌های اول و دوم نیز خواهد شد. از لحاظ تئوری، تابع توزیع آمیخته قادر به تخمین هر نوع تابع توزیع ناشناخته‌ای، با دقت بالا، می‌باشد (به شرطی که تعداد المانهای آن به اندازه‌ی کافی زیاد باشند و داده‌ی کافی برای تخمین آنها وجود داشته باشد) (وانگ و اسکات^۱، ۲۰۱۹). در این مقاله یک راهکار برای تعمیم متداول‌ترین روش تایمرهای تأخیری (تایمر تأخیری با n نمونه تأخیر) برای مواجهه با متغیرهای آلام با توزیع آمیخته ارائه می‌گردد که عملکرد این روش‌ها را در مواجهه با این دسته متغیرها، بهبود می‌بخشد. راهکار پیشنهادی بدون تغییر مکانیسم تولید آلام، با انتخاب تعداد آستانه‌های بیشتر و تعیین مقادیر مناسب برای آنها، روش را قادر به پاسخگویی مناسب در مواجهه با متغیرهای آلام با توزیع نامتعارف، می‌کند.

۳- تابع توزیع آمیخته

توزیع آمیخته، ترکیبی از دو یا چند توزیع احتمال است. درواقع متغیرهای تصادفی تشکیل‌دهنده‌ی این توزیع از چند مجموعه داده، تشکیل می‌شوند که هر مجموعه، توزیع مختص به خود را دارد. این توزیع توسط یک ترکیب خطی از توابع توزیع شناخته‌شده که می‌توانند تک‌متغیره یا چندمتغیره باشند نمایش داده می‌شود. شکل (۱) یک توزیع آمیخته را نشان می‌دهد که از سه توزیع گوسی تشکیل شده است.



شکل (۱). یک توزیع گوسی متشکل از سه توزیع گوسی با میانگین‌های ۱۰، ۱۵ و ۲۰

تابع چگالی احتمال یک توزیع آمیخته‌ی که از n توزیع با PDF-های $f_1(x), \dots, f_n(x)$ و با ضرایب وزنی $w_1, \dots, w_n, \sum w_i = 1$ تشکیل شده است، به صورت زیر می‌باشد.

$$f(x) = \sum_{i=1}^n w_i f_i(x) \quad (1)$$

¹ Wang and Scott

در بخش بعد ابتدا روش تایمر تأخیری با n نمونه تأخیر ۱ به صورت مختصر بیان می‌گردد سپس راهکار پیشنهادی و نحوه پیاده‌سازی آن توسط این روش بیان می‌شود.

۴-تایمر تأخیری با n نمونه تأخیر و کارایی آن

همانطور که در مقدمه بیان شد، در این روش، در شرایطی که آلام خاموش/روشن باشد اگر n نمونه‌ی پیاپی از متغیر آلام، بالاتر/پایین‌تر از آستانه‌ی تعریف‌شده باشد آلام صادر/قطع می‌شود. شاخص‌های کارایی این روش به صورت زیر محاسبه می‌شوند (کنداوتی و همکاران، ۲۰۱۱).

$$FAR = \frac{q_1^n(1 + q_2 + \dots + q_2^{n-1})}{q_1^n(1 + q_2 + \dots + q_2^{n-1}) + q_2^n(1 + q_1 + \dots + q_1^{n-1})}$$

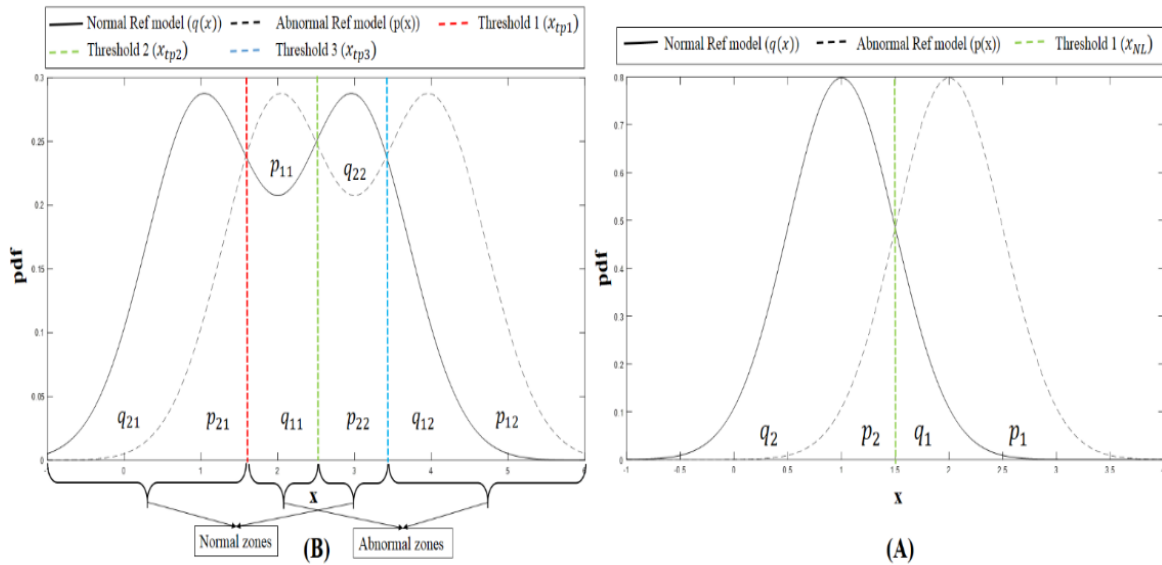
$$MAR = \frac{p_2^n(1 + p_1 + \dots + p_1^{n-1})}{p_2^n(1 + p_1 + \dots + p_1^{n-1}) + p_1^n(1 + p_2 + \dots + p_2^{n-1})} \quad (۲)$$

$$AAD = \frac{q_2^{n-1} \left(q_1^n p_2 \sum_{i=0}^{n-1} p_1^i + q_2 \left(\sum_{j=1}^{n-1} q_1^j \left(\sum_{k=0}^{n-j-1} p_1^k \right) - p_1^n \sum_{i=0}^{n-1} q_1^i \right) \right)}{p_1^n \left(q_2^n \sum_{i=0}^{n-1} q_1^i + q_1^n \sum_{i=0}^{n-1} q_2^i \right)}$$

که در این رابطه q_1, q_2, p_1 و p_2 مقادیر احتمالاتی هستند که در شکل (۲a) نشان داده شده‌اند و مطابق رابطه (۳) محاسبه می‌شوند.

$$q_1 = \int_{x_{tp}}^{\infty} q(x), \quad q_2 = 1 - q_1$$

$$p_1 = \int_{x_{tp}}^{\infty} p(x), \quad p_2 = 1 - p_1 \quad (۳)$$

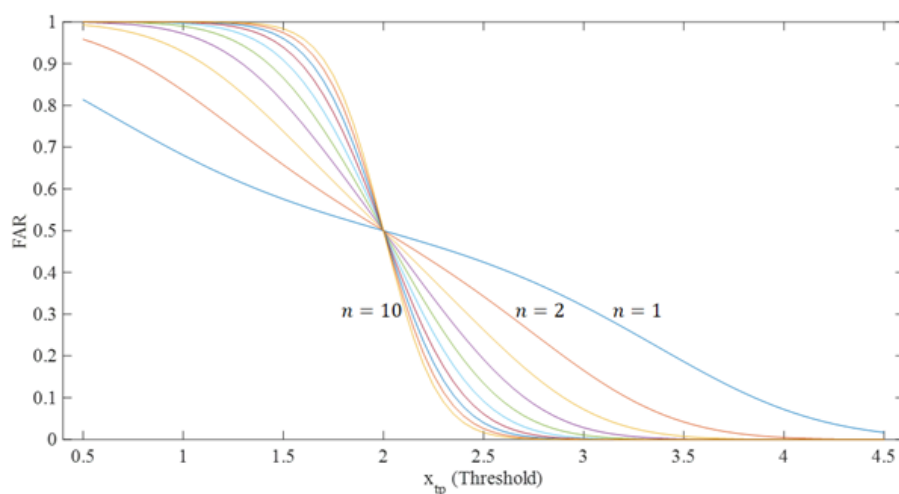


شکل (۲). مدل‌های مرجع نرمال و غیرنرمال دارای (A) توزیع گوسی، (B) توزیع آمیخته

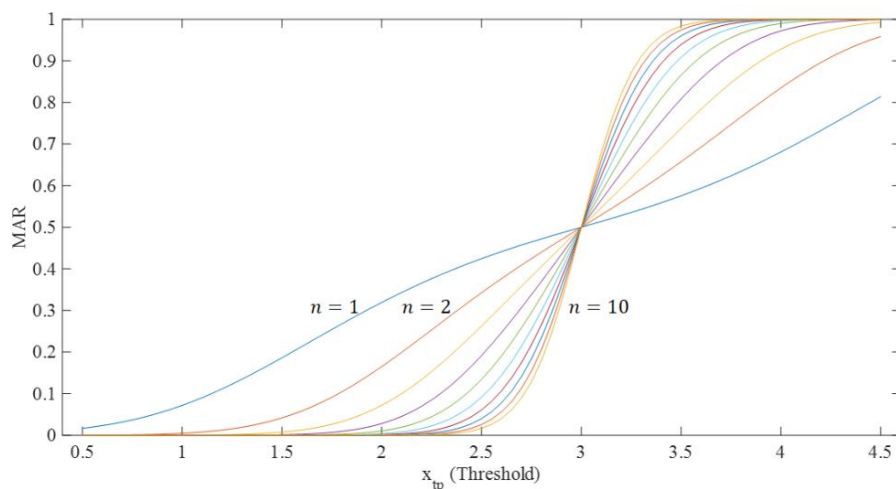
حال کارایی روش تایمر تأخیری با n نمونه تأخیر را برای متغیرهای آلام با توزیع آمیخته توضیح می‌دهیم. ابتدا فرض کنید که تابع توزیع متغیر آلام در شرایط نرمال و غیرنرمال، از نوع آمیخته و به صورت زیر باشد (هر تابع توزیع آمیخته از ترکیب دو تابع توزیع گوسی با ضرایب برابر ساخته شده است).

$$\begin{aligned} q(x) &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi(0.5)^2}} \left(\exp\left(-\frac{(x-1)^2}{2(0.5)^2}\right) + \exp\left(-\frac{(x-3)^2}{2(0.5)^2}\right) \right) \right) \\ p(x) &= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi(0.5)^2}} \left(\exp\left(-\frac{(x-2)^2}{2(0.5)^2}\right) + \exp\left(-\frac{(x-4)^2}{2(0.5)^2}\right) \right) \right) \end{aligned} \quad (۴)$$

حال با استفاده از این توابع توزیع و روابط ۲ و ۳ مقادیر شاخص‌های ارزیابی تایمر تأخیری با n نمونه تأخیر به ازای مقادیر مختلف $n \in \{1, 2, \dots, 10\}$ و آستانه $x_{tp} \in \{0.5, 0.55, \dots, 4.5\}$ محاسبه و در شکل‌های (۳)، (۴) و (۵) نشان داده شده است.



شکل (۳). تغییرات شاخص FAR به ازای تغییرات n و آستانه

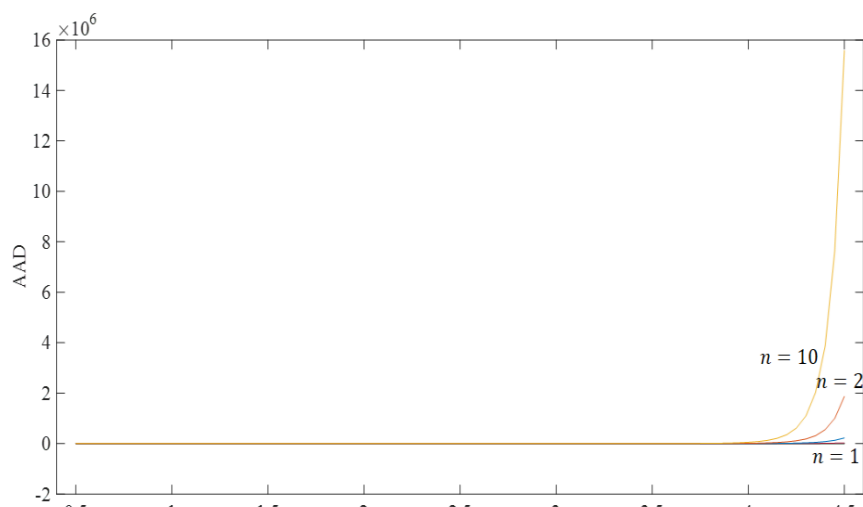


شکل (۴). تغییرات شاخص MAR به ازای تغییرات n و آستانه

شکل (۳) نشان می‌دهد که افزایش x_{tp} (آستانه) منجر به بهبود FAR خواهد شد. همچنین افزایش مقدار پارامتر n در بازه‌ی $x_{tp} \geq 2$ و کاهش آن در بازه‌ی $x_{tp} < 2$ منجر به بهبود شاخص FAR خواهد شد. دلیل این موضوع این است که $x = 2$ نقطه‌ای است که در آنجا مقدار تابع توزیع تجمعی نرمال $q(x)$ برابر 0.5 است.

شکل (۴) نشان می‌دهد که برخلاف حالت قبل، در اینجا کاهش x_{tp} (آستانه) منجر به بهبود MAR خواهد شد. همچنین افزایش مقدار پارامتر n در بازه‌ی $x_{tp} \leq 3$ و کاهش آن در بازه‌ی $x_{tp} > 3$ منجر به بهبود شاخص MAR خواهد شد. دلیل این موضوع این است که $x = 3$ نقطه‌ای است که در آنجا مقدار تابع توزیع تجمعی غیرنرمال $p(x)$ برابر 0.5 است.

شکل نشان می‌دهد که برخلاف FAR و MAR، شاخص AAD رفتار ساده‌ای نسبت به تغییرات n و آستانه دارد و کاهش این دو پارامتر این شاخص را بهبود می‌دهد.



شکل (۵). تغییرات شاخص AAD به ازای تغییرات n و آستانه

۵- راهکار پیشنهادی

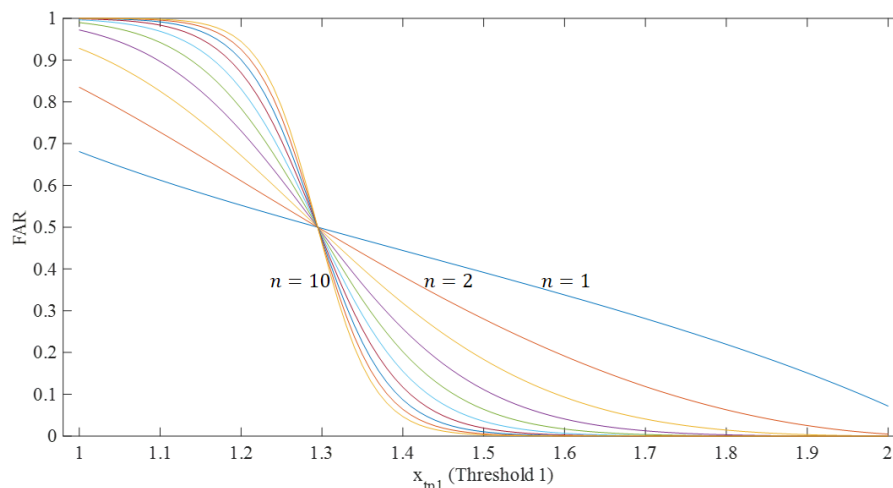
راهکار پیشنهادی توسط گام‌های زیر روی روش تایمر تأخیری با n نمونه تأخیر پیاده‌سازی می‌شود.

- استفاده از l آستانه به جای یک آستانه. l تعداد تقاطع‌های بین مدل‌های مرجع می‌باشد. به عنوان مثال در شکل (۲b) که مدل‌های مرجع آمیخته را نشان می‌دهد، $l = 3$ می‌باشد.
- تقسیم کردن نواحی بین آستانه‌ها به نواحی نرمال و غیرنرمال براساس مقادیر توابع توزیع تجمعی نرمال و غیرنرمال در آن نواحی. به عنوان مثال اگر برای یک ناحیه مقدار تابع توزیع تجمعی نرمال بزرگتر از مقدار تابع توزیع تجمعی غیرنرمال باشد $(\Phi_{zone i} q(x) > \Phi_{zone i} p(x))$ آنگاه آن ناحیه به عنوان یک ناحیه نرمال در نظر گرفته می‌شود و بالعکس (شکل (۲b)).
- پیاده‌سازی روش به این صورت که اگر n نمونه‌ی پیاپی از متغیر آلام، در نواحی غیرنرمال/نرمال قرار گرفت آلام صادر/قطع می‌شود.
- دو نکته‌ی زیر برای تنظیم پارامترهای طراحی راهکار پیشنهادی بایستی مورد توجه قرار گیرد.
- جهت بهبود شاخص FAR، مقادیر آستانه‌ها باید به نحوی تغییر داده شوند که مجموع مقادیر تابع توزیع تجمعی نرمال در نواحی نرمال افزایش یابد.
- جهت بهبود شاخص‌های MAR و AAD مقادیر آستانه‌ها باید به نحوی تغییر داده شوند که مجموع مقادیر تابع توزیع تجمعی غیرنرمال در نواحی غیرنرمال افزایش یابد.

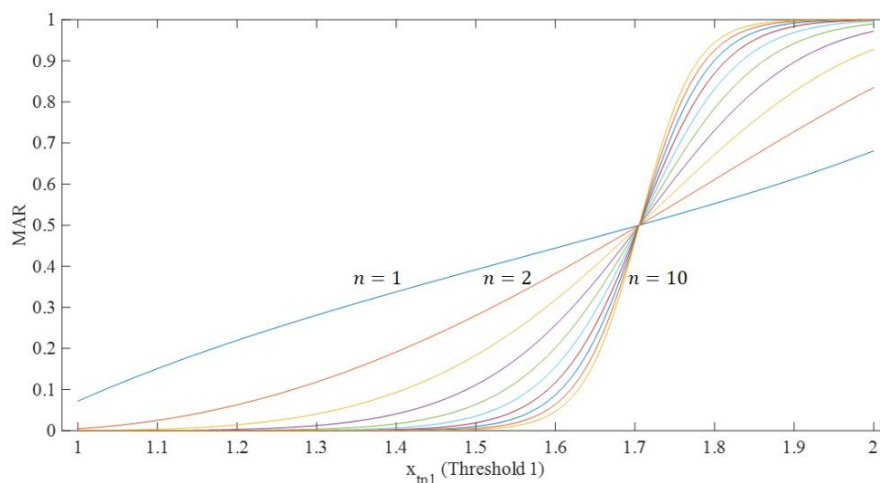
۶- نتایج

در این بخش، تأثیر راهکار پیشنهادی بر کارایی روش تایمر تأخیری با n نمونه تأخیر بررسی می‌شود. راهکار پیشنهادی مطابق گام‌های مذکور در بخش قبل پیاده‌سازی شده و شاخص‌های ارزیابی آن محاسبه می‌شود. راهکار پیشنهادی مقادیر q_1, q_2, p_1 و p_2 را تغییر می‌دهند که جزئیات محاسبه آنها در [22] آمده است. در این مقاله، برای احتراز از طولانی شدن مطلب، شاخص‌های ارزیابی به ازای مقادیر مختلف $n \in \{1, 2, \dots, 10\}$ و مقادیر مختلف آستانه‌ها

$(x_{tp1}, x_{tp2}, x_{tp3}) \in \{(1, 3, 3), (1.01, 2.99, 3.01), \dots, (2, 2, 4)\}$ محاسبه و گزارش شده است (شکل‌های (۶)، (۷) و (۸)).



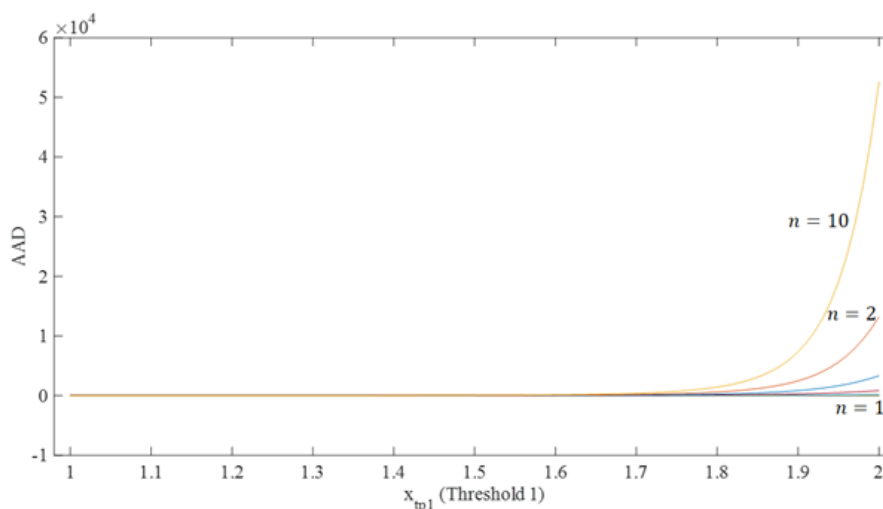
شکل (۶). تغییرات شاخص FAR به ازای تغییرات n و آستانه بعد از اعمال روش پیشنهادی



شکل (۷). تغییرات شاخص MAR به ازای تغییرات n و آستانه بعد از اعمال روش پیشنهادی

شکل‌های (۶) تا (۸) شاخص‌های کارایی روش تایمر تأخیری با n نمونه تأخیر را با بکارگیری راهکار پیشنهادی نشان می‌دهند. با مقایسه‌ی روند تغییرات شاخص‌های کارایی قبل و بعد از اعمال راهکار مشخص می‌گردد که بعد از اعمال راهکار بدون ازدست‌دادن FAR و MAR، بهبود خوبی در AAD حاصل شده است. برای بررسی دقیق‌تر، نقاطی که تابع هدف زیر را کمینه می‌کنند قبل و بعد از اعمال راهکار تعیین و با هم مقایسه می‌کنیم (زو و همکاران، ۲۰۱۱).

$$j(\theta) = \alpha.FAR + \beta.MAR + \gamma.AAD \quad (۶)$$



شکل (۸). تغییرات شاخص AAD به ازای تغییرات n و آستانه بعد از اعمال روش پیشنهادی

که در آن α ، β و γ به ترتیب ضرایب اهمیت شاخص‌های FAR، MAR و AAD؛ و θ مجموعه‌ی پارامترهای طراحی می‌باشد. با توجه به اینکه مقادیر FAR و MAR حداکثر برابر یک هستند ضرایب α ، β و γ به صورت زیر انتخاب شده اند.

$$(\alpha, \beta, \gamma) = (AAD_{max}, AAD_{max}, 1) \quad (7)$$

که در رابطه‌ی فوق AAD_{max} ، ماکزیمم مقدار محاسبه‌شده برای شاخص AAD می‌باشد. نقاط بهینه‌ی کارایی روش تایمر تأخیری با n نمونه تأخیر، قبل و بعد از اعمال راهکار پیشنهادی در جدول نشان داده شده است.

جدول (۱). مقایسه‌ی شاخص‌های کارایی روش تایمر تأخیری با n نمونه تأخیر قبل و بعد از اعمال راهکار پیشنهادی

پارامترهای طراحی	AAD	MAR	FAR	
$n = 10$, $x_{tp} = 2.5$	131.0978	0.0165	0.0165	قبل از اعمال راهکار
$n = 10$, $x_{tp1} = 1.5$, $x_{tp2} = 2.5$, $x_{tp3} = 3.5$	63.2467	0.0028	0.0028	بعد از اعمال راهکار

همانطور که در جدول مشاهده می‌شود راهکار پیشنهادی توانسته است کارایی روش تایمر تأخیری با n نمونه تأخیر را برای متغیرهای با توزیع آمیخته به میزان قابل توجهی بهبود بخشد بطوریکه در شاخص‌های FAR و MAR، کارایی روش بعد از اعمال راهکار پیشنهادی حدوداً ۶ برابر و در شاخص AAD، بیش از دو برابر بهبود یافته است.

۷- بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله راهکاری ارائه گردید که با استفاده از آن می‌توان کارایی روش متداول تولید آلام ریست را برای متغیرهای آلام با توزیع نامتعارف بهبود داد. راهکار پیشنهادی برای یک مثال خاص، به ازای پارامترهای طراحی مختلف روی روش ریست، پیاده‌سازی و نتایج آن در شکل‌های (۶)، (۷) و (۸) گزارش گردید. با مقایسه‌ی نتایج، قبل و بعد از اعمال راهکار، بهبود در عملکرد سیستم بعد از اعمال راهکار، مشخص گردید. علاوه بر این جدول، نقاط بهینه‌ی کارایی قبل و بعد از اعمال راهکار را نشان داد که مطابق آن راهکار پیشنهادی منجر به بهبود حدود ۶ برابری در شاخص‌های FAR و MAR، و بهبود ۲ برابری در شاخص AAD شد. در این مقاله کارایی راهکار پیشنهادی برای یکی از روش‌های مبتنی بر تایمرهای تأخیری (روش ریست) ارائه گردید لذا کارایی این راهکار برای سایر تعمیم‌های تایمرهای تأخیری در کارهای آتی انجام خواهد گردید. هر چند که راهکار پیشنهادی عملکرد روش ریست را برای متغیرهای آلام با توزیع نامتعارف را به صورت قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌دهد اما می‌توان وابسته‌بودن پارامترهای طراحی سیستم هشدار (تعداد آستانه‌های آن) به تعداد المان‌های تابع توزیع متغیر آلام را محدودیت آن دانست.

مراجع

- طاهری کلانی، ج. اصلان صفت، ک. لطیف شبگاهی، غ. (۱۳۹۵). ارائه یک روش سیستماتیک برای طراحی و تحلیل یک سیستم آلام تک‌متغیره مبتنی بر سناریوی پناستی، مجله کنترل، (۴)، ۱۰، ۱-۱۵.
- طاهری کلانی، ج. لطیف شبگاهی، غ. علیاری شوره‌دلی، م. (۱۳۹۸). طراحی یک سیستم آلام تک‌متغیره با رویکرد تایمرهای تأخیری مبتنی بر سناریوی آستانه چندگانه. مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، (۳)، ۴۹، ۱۱۶۵-۱۱۵۳.
- محمدزاده ایوقی، و. علیاری شوره‌دلی، م. (۱۳۹۸). آنالیز حساسیت و طراحی سیستم آلام تک‌متغیره بر مبنای تایمر تأخیر با لحاظ کردن خطای اندازه‌گیری. مجله مهندسی مکانیک مدرس، (۵)، ۱۹، ۱۱۶۵-۱۱۵۵.
- ولی‌پوری، ا. (۱۳۹۸). طراحی و تحلیلی یک سیستم تولید هشدار برای متغیرهای هشدار با چگالی احتمال آمیخته"، پیشنهاد رساله دکتری، دانشکده مهندسی برق. دانشگاه شهید بهشتی.
- Su, J., Guo, C., Zang, H., Yang, F., Huang, D., Gao, X., & Zhao, Y. (2018). A multi-setpoint delay-timer alarming strategy for industrial alarm monitoring. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 54, 1-9.
- ISA, (Instrumentation, Systems and Automation Society), Management of Alarm Systems for the Process Industries, ISA 18.02, North Carolina, 2009.
- Eemua, (2007), EEMUA-191. Alarm systems-a guide to design, management and procurement.
- Izadi, I., Shah, S. L., Shook, D. S., Kondaveeti, S. R., & Chen, T. (2009). A framework for optimal design of alarm systems. *IFAC Proceedings Volumes*, 42(8), 651-656.
- Adnan, N. A., Izadi, I., & Chen, T. (2011). On expected detection delays for alarm systems with deadbands and delay-timers. *Journal of Process Control*, 21(9), 1318-1331.
- Kondaveeti, S. R., Izadi, I., Shah, S. L., & Chen, T. (2011, June). On the use of delay timers and latches for efficient alarm design. In *2011 19th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED)* (pp. 970-975). IEEE.
- Xu, J., Wang, J., Izadi, I., & Chen, T. (2011). Performance assessment and design for univariate alarm systems based on FAR, MAR, and AAD. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 9(2), 296-307.
- Adnan, N. A., Cheng, Y., Izadi, I., & Chen, T. (2013). Study of generalized delay-timers in alarm configuration. *Journal of Process Control*, 23(3), 382-395.
- Zeng, Z., Tan, W., & Zhou, R. (2017). Performance assessment for generalized delay-timers in alarm configuration. *Journal of Process Control*, 57, 80-101.
- Lin, J., Sun, D., Bai, X., & Chen, L. (2018). A generalized alarm delay-timer's performance indices computing method. *Systems Science & Control Engineering*, 6(3), 297-304.
- Heidari, M., & Izadi, I. (2019). Comment on "Performance assessment for generalized delay-timers in alarm configuration". *Journal of Process Control*, 84, 168-170.
- Taheri-Kalani, J., Latif-Shabgahi, G., & Shooredeli, M. A. (2018). On the use of penalty approach for design and analysis of univariate alarm systems. *Journal of Process Control*, 69, 103-113.
- Zang, H., Yang, F., & Huang, D. (2015). Design and analysis of improved alarm delay-timers. *IFAC-PapersOnLine*, 48(8), 669-674.

- Kaced, R., Kouadri, A., & Baiche, K. (2019). Designing alarm system using modified generalized delay-timer. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 61, 40-48.
- Afzal, M. S., & Chen, T. (2017). Analysis and design of multimode delay-timers. *Chemical Engineering Research and Design*, 120, 179-193.
- Tulsyan, A., Alrowaie, F., & Gopaluni, B. (2018). Design and assessment of delay timer alarm systems for nonlinear chemical processes. *AIChE Journal*, 64(1), 77-90.
- Aslansefat, K., Gogani, M. B., Kabir, S., Shoorehdeli, M. A., & Yari, M. (2020). Performance evaluation and design for variable threshold alarm systems through semi-Markov process. *ISA transactions*, 97, 282-295.
- Wang, Z., & Scott, D. W. (2019). Nonparametric density estimation for high-dimensional data—Algorithms and applications. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 11(4), e1461.
- Xu, J., Wang, J., Izadi, I., & Chen, T. (2011). Performance assessment and design for univariate alarm systems based on FAR, MAR, and AAD. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 9(2), 296-307.