مجله کنترل
ISSN 2008-8345
جلد ۱۰، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۵، صفحه ۱۵-۱

ارائه یک روش سیستماتیک برای طراحی و تحلیل یک سیستم هشدار تک‌متغیره مبتنی بر سناریوی پنالتی

جعفر طاهری کلانی[۱]، کوروش اصلان صفت[۲]، غلامرضا لطیف شبگاهی[۳]

[۱] دانشجوی دکترای مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه شهید بهشتی، Ja_Taheri@abu.ac.ir

[۲] فارغ التحصیل کارشناسی ارشد مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه شهید بهشتی، k_aslansefat@abu.ac.ir

[۳] استادیار دانشکده مهندسی برق، گروه کنترل، دانشگاه شهید بهشتی، Gh_latif@abu.ac.ir

(تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۵/۷/۶، تاریخ پذیرش مقاله ۱۳۹۵/۱۰/۵)

چکیده: در این مقاله حالت توسعه‌یافته‌ای از تایمرهای تأخیری بر مبنای ایده پنالتی و زنجیره مارکوف برای طراحی یک سیستم هشدار ارائه شده است. مکانیزم پنالتی در واقع حالت توسعه یافته روش n نمونه تأخیر در رخداد/قطع هشدار است. در این مقاله شاخص‌های "نرخ هشدار نادرست" ، "نرخ هشدار از دست رفته" و "میانگین تأخیر هشدار" برای سناریوی n نمونه تأخیر و تعداد پنالتی i با استفاده از مدل مارکوف استخراج شده و عملکرد سیستم هشدار مورد ارزیابی قرار می گیرد. به منظور محاسبه شاخص میانگین تأخیر هشدار در سناریوی پنالتی، شاخص جدیدی تحت عنوان "میانگین زمانی رخداد هشدار" با استفاده از مفهوم "میانگین زمانی بین خرابی" در بحث قابلیت اطمینان سیستم‌ها معرفی می گردد و با استفاده از آن، شاخص "میانگین تأخیر هشدار" محاسبه می گردد. مقاله با معرفی یک تابع هدف مبتنی بر شاخص های مذکور، مقادیر بهینه ای را برای "تعداد تأخیرها" و "تعداد پنالتی ها" بر اساس الگوریتم ژنتیک تعیین می کند. نشان داده می شود که الگوریتم معرفی شده در مقایسه با روش n نمونه تأخیر در طراحی سیستم های هشدار، از عملکرد بهتری برخوردار است. به منظور نشان دادن عملکرد مناسب سناریوی پنالتی، این ایده بر روی چندین مثال صنعتی و کاربردی اعمال شده و نتایج حاصله با روش های معمول مقایسه شده است.

کلمات کلیدی: سیستم هشدار، تایمر تأخیری، سناریوی پنالتی، میانگین زمانی رخداد هشدار، الگوریتم ژنتیک.

A Systematic Approach to Design and Analysis of Univariate Alarm Systems Using Penalty Approaches

Jafar Taheri Kalani, Kourosh Aslansefat, Gholamreza Latif Shabgahi

Abstract: This paper presents a new method for designing a generalized delay timer based on penalty scenario and Markov chain schemes. The penalty approach is the extension of n-sample on/off delay approaches in designing alarm systems. Three performance indices named, False Alarm Rate (FAR), Missed Alarm Rate (MAR) and Average Alarm Delay (AAD) are derived for penalty approaches using Markov models. Also, the new index named “Mean Time to Alarm (MTTA)” is introduced to analysis alarm system and computation of AAD in penalty scenario. The optimal values of delays and penalties are derived based on target function using Genetic Algorithm (GA). Finally, the effectiveness of the proposed method is investigated and compared with other methods through a case study.

Keywords: Alarm system, Delay timer, Penalty scenario, Mean Time to Alarm, Genetic Algorithm.

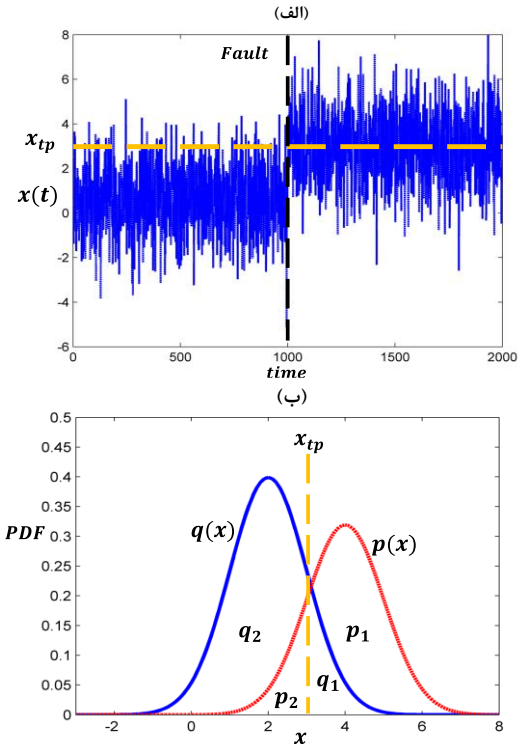
[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.4.6.2]

۱- مقدمه

امروزه سیستم های تشخیص و مدیریت هشدار جزء لاینفک سیستم های صنعتی به شمار می روند و نقش بسزایی در ایمنی و عملکرد مناسب سیستم های صنعتی دارند. مکانیزم هشدار در سیستم های مانیتورینگ امروزی مانند سیستم های کنترلی توزیع شده[1] (DCS) ، کنترل نظارتی[2] و سیستم های اکتساب داده (SCADA) کاربرد فراوانی دارد. یک سیستم هشدار مجموعه ای از سخت افزارها و نرم افزارها است که بر مبنای یک سری استانداردها [۱-۲] در تولید هشدار، در تشخیص به موقع خطاهای رخ داده در قسمت های مختلف یک واحد صنعتی کمک می کند. واحدهای صنعتی بزرگ از اجزاء فراوانی تشکیل شده اند که ممکن است در هر کدام از اجزاء این سیستم خطا رخ دهد، از این رو تشخیص رخداد خطا و پاسخ دهی به آنها یک موضوع حیاتی است. معمولاً اطلاعات واحدهای مختلف یک سیستم صنعتی به صورت متمرکز و از طریق مانیتورینگ، کنترل می شود. با پیچیده تر شدن واحد صنعتی، تعداد هشدار هایی که بوسیله سیستم هشدار صادر می شود زیاد شده و حتی در بعضی اوقات به حالت سیل هشدار[3] می رسد که تشخیص هشدار های ضروری بوسیله کاربر تقریباً غیرممکن می شود. از این رو طراحی یک سیستم هشدار مناسب که بتواند این هشدار ها را مدیریت کرده و فقط به هشدار های ضروری پاسخ دهد از اهمیت فراوانی برخوردار است. لذا در سال های اخیر ، طراحی و تحلیل سیستم های هشدار در مراجع مختلف [۳-۲۰] مورد توجه محققان قرار گرفته است.

۱-۱ مرور کارهای گذشته

در مرجع [۳] روشی نرم افزاری برای کاهش تعداد هشدار ها برمبنای پاک سازی هشدار ها ارائه شده است. در مرجع [۴] یک روش هندسی برای مدیریت و کاهش هشدار برای سیستم های چند متغیره بیان شده است. در مرجع [۵] روش تخمین باند مرده[4] به منظور کاهش هشدار ها و در [۶] روشی برای کاهش پدیده چترینگ هشدار[5] بر اساس مفهوم طول اجرا[6] مورد توجه قرار گرفته است. در مراجع [۷-۸] روشی مبتنی بر کران هشدار[7] برای مدیریت هوشمند هشدار پیشنهاد شده است. در بعضی مراجع مانند [۹-۱۱] فیلترینگ هشدار[8] مورد بحث قرار گرفته است. در مرجع [۹] از درخت عیب دینامیکی استفاده شده است. در مرجع [۱۰] شاخص میانگین تأخیر در تشخیص عیب برای فیلترهای MV محاسبه شده و در مرجع [۱۱] شرایط بهینه انتخاب پارامترهای یک فیلتر MV مورد بررسی قرار گرفته است. در مراجع [۱۲] و [۱۳] بحث تشخیص پدیده "چترینگ هشدار" مورد بررسی قرار گرفته است و معیارهایی برای تشخیص چترینگ هشدار مبتنی بر مفهوم "طول اجرا" معرفی گردیده است. در مرجع [۱۴] سناریوی n نمونه تأخیر در رخداد و قطع هشدار معرفی گردیده و در مرجع [۱۵] سناریوی n out-of m به عنوان حالت عمومی تایمرهای تأخیری معرفی شده است و در مرجع [۱۶] شاخص تأخیر در تشخیص هشدار برای تایمرهای تأخیری و باند مرده محاسبه شده است. در سال‌های اخیر علاوه بر سیستم های هشدار تک متغیره، سیستم های هشدار چندمتغیره نیز مورد توجه قرار گرفته است. در مرجع [۱۷] روشی برای تنظیم بهینه آستانه در سیستم های چند متغیره و در مرجع [۱۸] با استفاده از توزیع T2 و Q آماری، روشی برای تشخیص عیب های جمعی و ضربی در سیستم های چند متغیره معرفی گردیده است. علاوه بر سیستم های چند متغیره در سال های اخیر، کاربرد تئوری های تصمیم گیری در طراحی سیستم های هشدار نیز مورد توجه قرار گرفته است. در مرجع [۱۹] از "تئوری شواهد" به عنوان راهکاری برای طراحی یک سیستم هشدار استفاده شده است و مرجع [۲۰] به عنوان یک مقاله مروری، علاوه بر دلایل عمده وقوع پدیده سیل هشدار و مراحل طراحی یک سیستم هشدار، به روش های طراحی سیستم های هشدار، چالش‌ها و موضوعات تحقیقاتی باز در حوزه سیستم های هشدار پرداخته است.



شکل ۱: (الف): فضای نمونه یک سیگنال گسسته تصادفی. (ب) : توابع توزیع احتمال مربوط به قسمت های نرمال و غیر نرمال سیگنال $x(t)$

در طراحی و تحلیل عملکرد یک سیستم هشدار شاخص‌هایی مانند تعداد هشدارها در ساعت، پیک تعداد هشدارها در ساعت و ... مورد استفاده قرار می گیرد [۲] علاوه بر آن، معمولاً سه شاخص، نرخ هشدار

[1] Distributed Control Systems
[2] Supervisory Control
[3] Alarm Floods
[4] Dead Band
[5] Alarm Chattering
[6] Run Length
[7] Alarm Limits
[8] Alarm Filtering

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.4.6.2]

نادرست[1] (FAR)، نرخ هشدار از دست رفته[2] (MAR) و میانگین تأخیر هشدار[3] (AAD) نیز در تحلیل و طراحی سیستم های هشدار مورد استفاده قرار می گیرد [۱۴]. پارامتر FAR عملکرد سیستم هشدار در تشخیص هشدار های ناصحیح از صحیح را نشان می دهد، پارامتر MAR بیانگرهشدار های رخ داده از دست رفته است و پارامتر AAD نیز معرف سرعت عملکرد سیستم هشدار در تشخیص هشدار هایِ رخ داده است. با توجه به این تعاریف می توان نتیجه گرفت، هر چقدر که این پارامترها کوچکتر باشند عملکرد سیستم هشدار بهتر خواهد بود. در مرجع [۱۴] سناریوی n نمونه تأخیر برای طراحی یک تایمر تأخیری معرفی شده است و با استفاده از زنجیره مارکوف شاخص‌های مختلف یک سیستم هشدار مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مرجع [۱۵] سناریوی m out-of n به عنوان حالت عمومی تایمرهای تأخیری معرفی گردیده است.

۲-۱ الگوریتم پیشنهادی

در این مقاله حالت جامع تری نسبت به روش ارائه شده در مرجع [۱۴] برای طراحی سیستم هشدار مبتنی بر پارامتر پنالتی i معرفی می شود. سناریوی پنالتی در واقع حالت توسعه یافته روش n نمونه تأخیر در رخداد هشدار است که در مرجع [۱۴] معرفی شده است. در این مقاله علاوه بر شاخص های FAR و MAR ، شاخص دیگری به نام "میانگین زمان رخداد هشدار" یا MTTA[4] معرفی می گردد و نشان داده می شود که با استفاده از این شاخص، می توان شاخص AAD معرفی شده در مرجع [۱۴] را به راحتی برای سناریوی پنالتی محاسبه کرد. این در حالی است که محاسبه شاخص AAD برای سناریوی پنالتی با استفاده از روش مرجع [۱۴] تا حدودی مشکل و زمان بر است. این شاخص ها برای یک سیستم هشدار با n نمونه تأخیر در روشن/خاموش شدن هشدار با تعداد i پنالتی با استفاده از مدل مارکوف استخراج می شود. با اضافه کردن پارامتر i به مسأله، درجه آزادی طراحی سیستم هشدار افزایش پیدا می کند و امکان رسیدن به اهداف طراحی افزایش می یابد اما استخراج شاخص‌های FAR و MAR در حالت کلی پیچیده می شود. لذا الگوریتمی برای تحلیل مدل‌های مارکوف و استخراج این شاخص‌ها معرفی می گردد. پس از استخراج شاخص های عملکردی سیستم هشدار، به منظور انتخاب بهینه پارامترهای n ، i و آستانه از الگوریتم بهینه سازی ژنتیک استفاده می گردد. درنهایت عملکرد الگوریتم پیشنهادی با ارائه چندین مثال عددی و صنعتی مورد بررسی قرار گرفته و برتری آن نسبت به روش های مرسوم طراحی سیستم های هشدار نشان داده می شود.

این مقاله به صورت زیر سازماندهی می شود. بخش ۲ به تعاریف اولیه و معرفی شاخص‌های یک سیستم هشدار پایه پرداخته است. در بخش ۳ روش مرسوم n نمونه تأخیر در طراحی سیستم هشدار و روش جدید پیشنهادیِ مبتنی بر سناریوی پنالتی معرفی می گردد. در بخش ۴ شاخص های ارزیابی عملکرد سیستم هشدار و نحوه استخراج آنها از روی مدل مارکوف سیستم توضیح داده می‌شود. بخش ۵ با جمع بندی مطالب گفته شده، یک روش سیستماتیک برای طراحی سیستم هشدار مبتنی بر الگوریتم ژنتیک ارائه می کند. روش پیشنهادی روی چند مثال واقعی اعمال شده و نتایج شبیه سازی حاصله با نتایج حاصل از اعمال روش ارائه شده در مرجع [۱۴] مقایسه و تحلیل شده است.

۲- شاخص های عملکردی برای یک سیستم هشدار پایه

در این بخش، شاخص های MAR،FAR و AAD مربوط به یک سیستم هشدار پایه برای یک سیستم تک متغیره (تک سنسوره) بیان می گردد. فضای نمونه مربوط به سیگنال گسسته تصادفی $x(t)$ با دوره نمونه برداری h نشان داده شده در شکل ۱ (الف) را در نظر بگیرید. در این شکل x_{tp} آستانه در نظر گرفته شده برای رخداد هشدار است. فرض کنید که در لحظه $t = 1000h$ یک عیب رخ داده باشد و سناریوی رخداد و قطع هشدار بدین صورت باشد که، اگر n نمونه پشت سر هم از سیگنال $x(t)$ از سطح x_{tp} عبور کند(بالاتر باشد)، هشدار صادر می شود. در صورتیکه n نمونه پشت سرهم بعدی از سطح x_{tp} پایین تر باشد هشدار صادر شده قبلی قطع می گردد. برای سادگی حالت $n = 1$ را در نظر بگیرید. لذا داده های $x(1:1000)$ به عنوان داده‌های نرمال و داده های $x(1001:2000)$ به عنوان داده‌های غیرنرمال در نظر گرفته می شود. پس از جداسازی داده های نرمال و غیرنرمال، می توان توزیع احتمالاتی این داده ها را تخمین زد. تابع توزیع احتمال برای این داده ها مطابق شکل ۲ (ب)، به صورت نرمال فرض شده است. در این شکل $q(x)$ تابع توزیع احتمال مربوط به داده های نرمال و $p(x)$ تابع توزیع مربوط به داده های غیرنرمال می باشد.

برای این سیستم هشدار پایه، پارامتر FAR برابر است با سطح زیر نمودار تابع توزیع احتمال مربوط به داده های نرمال که از x_{tp} بزرگتر باشند و به صورت زیر تعریف می شود:

$$FAR = q_1 = \int_{x_{tp}}^{+\infty} q(x)dx \qquad (۱)$$

در واقع شاخص FAR بیانگر هشدارهایی است که به واسطه داده های نرمال که بالاتر از آستانه قرار گرفته اند، اتفاق افتاده است. واضح است که این هشدارها، هشدارهای اضافی هستند. همچنین پارامتر MAR برابر است با سطح زیر نمودار تابع توزیع احتمال مربوط به داده های غیرنرمال که از x_{tp} کوچکتر باشند و به صورت زیر تعریف می شود:

$$MAR = p_2 = \int_{-\infty}^{x_{tp}} p(x)dx \qquad (۲)$$

که بیانگر هشدارهایی است که به واسطه داده های غیرنرمال که پایین آستانه قرار گرفته اند، از دست رفته است یا رخ نداده است.

[1] False Alarm Rate
[2] Miss Alarm Rate
[3] Average Alarm Delay
[4] Mean Time To Alarm

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.4.6.2]

اگر t_0 لحظه وقوع عیب باشد و t_a لحظه رخداد هشدار باشد، T_d به عنوان تأخیر در رخداد هشدار در نظر گرفته شده و به صورت زیر تعریف می گردد:

$$T_d = t_a - t_0 \qquad (۳)$$

با توجه با اینکه سیگنال $x(t)$ یک سیگنال تصادفی گسسته با زمان نمونه برداری h است، T_d نیز یک متغیر تصادفی گسسته به صورت $\{0h.\,1h.\,2h.\ldots\}$ خواهد بود لذا پارامتر AAD به صورت امید ریاضی متغیر تصادفی T_d تعریف می گردد و به صورت زیر بیان می شود

$$AAD = E\left(T_d\right) \qquad (۴)$$

با توجه به مرجع [۱۴]، پارامتر AAD را می توان بر حسب متغیرهای p_1 و p_2 بیان کرد:

$$AAD = E\left(T_d\right) = \sum_{i=0}^{\infty} ihp_2^i p_1 = h\frac{p_2}{p_1} \qquad (۵)$$

که در رابطه بالا $p_1 = 1 - p_2$ است.

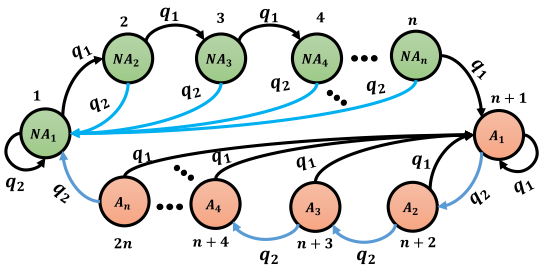
در این بخش فرض کردیم که $n = 1$ باشد و هر بار که یک نمونه از سیگنال از سطح آستانه بیشتر شد، هشدار صادر گردد و هر بار که یک نمونه کوچکتر از آستانه شد سیگنال هشدار قطع گردد. در حالت کلی می توان برای مقادیر مختلفی از n، سیستم هشدار را طراحی کرد. این هدف با استفاده از ابزار مارکوف قابل دستیابی است. در ادامه سناریوهای مختلف در طراحی تایمرهای تأخیری و سناریوی پیشنهادی پنالتی معرفی می گردد.

۳- معرفی سناریوی ریست و ارائه الگوریتم پیشنهادی (سناریوی پنالتی)

در این بخش ابتدا روش مرجع [۱۴] در طراحی سیستم های هشدار مورد بررسی قرار می گیرد که در این مقاله تحت عنوان سناریوی ریست معرفی می گردد و در ادامه حالت توسعه یافته تری از این روش تحت عنوان سناریوی پنالتی معرفی می گردد. در این بخش فرض می شود که بالاتر بودن مقدار سیگنال از سطح آستانه منجر به وقوع هشدار می گردد.

۳-۱ سناریوی ریست

در این سناریو اگر n نمونه پشت سرهم از سیگنال $x(t)$ از سطح آستانه x_{tp} بالاتر باشد سیستم به حالت هشدار رفته و تا زمانیکه n نمونه متوالی از سطح آستانه پایین تر قرار نگیرد، هشدا قطع نمی گردد. سوال این است که اگر در بین این n نمونه که بالاتر/پایین‌تر از سطح آستانه قرار دارند، یک یا چند نمونه از سیگنال پایین‌تر/بالاتر از سطح آستانه باشد، سیستم هشدار بایستی چه تصمیمی بگیرد؟ این موضوع را می توان به کمک زنجیره مارکوف نشان داد. در شکل ۲ مدل مارکوف متناظر با شاخص FAR مربوط به یک سیستم هشدار با n نمونه تأخیر در رخداد و قطع هشدار با استفاده از سناریوی ریست، نشان داده شده است. حالت های بدون هشدار با NA و حالت های هشدار با A نمایش داده شده اند. در این شکل پارامتر q_1 همان پارامتر معرفی شده در (۱) می باشد و $q_2 = 1 - q_1$ است.



شکل ۲: مدل مارکوف داده های نرمال مربوط به سناریوی ریست برای n نمونه تأخیر در رخداد و قطع هشدار

با توجه به شکل ۲، فرض کنید اولین نمونه از سیگنال $x(t)$ پایین‌تر از آستانه باشد، در اینصورت در حالت NA_1 قرار داریم. اگر نمونه بعدی نیز پایین‌تر از آستانه باشد، در اینصورت با احتمال q_2 در همان حالت می مانیم و اگر نمونه بعدی بالاتر از آستانه باشد، آنگاه با احتمال q_1 به حالت NA_2 خواهیم رفت. حال اگر نمونه بعدی نیز بالاتر از آستانه باشد به حالت NA_3 خواهیم رفت. به همین شکل اگر n نمونه پشت سرهم بالاتر از آستانه قرار گیرد، سیستم هشدار به حالت هشدار A_1 خواهد رفت و هشدار صادر خواهد شد. حال اگر بین این n نمونه، نمونه ای از سیگنال پایین‌تر از آستانه قرار گیرد، سیستم هشدار به حالت اولیه NA_1 ریست خواهد شد. از این جهت این سناریو را سناریوی ریست می نامیم. در حالت هشدار یعنی A_1، اگر نمونه بعدی بالاتر از آستانه باشد در همان حالت می مانیم و اگر پایین‌تر باشد با احتمال q_2 به حالت A_2 خواهیم رفت و این روند ادامه پیدا خواهد کرد تا اینکه n نمونه پشت سرهم از سیگنال $x(t)$ پایین‌تر از آستانه قرار گیرد که در اینصورت به حالت NA_1 خواهیم رسید و هشدار قطع می گردد.

با توجه به [۱۴]، اگر معادلات مارکوف مربوط به شکل ۳ را در حالت ماندگار نوشته و حل کنیم، شاخص FAR به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$FAR = \frac{q_1^n\left(1+q_2+\ldots+q_2^{n-1}\right)}{q_1^n\left(1+q_2+\ldots+q_2^{n-1}\right)+q_2^n\left(1+q_1+\ldots+q_1^{n-1}\right)} \qquad (۶)$$

که در آن P احتمال حالت ماندگار است. حال اگر بخواهیم مدل مارکوف مربوط به شاخص MAR را رسم کنیم، کافی است در شکل ۳، به جای q_2 و q_1 به ترتیب p_2 و p_1 قرار دهیم. که در این حالت شاخص MAR به صورت زیر قابل محاسبه است

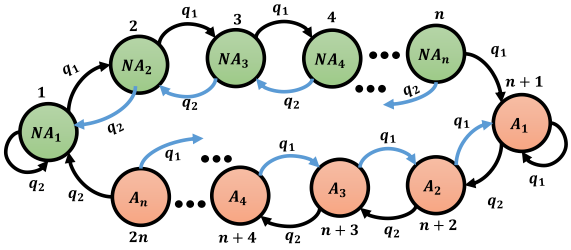
$$MAR = \frac{p_2^n\left(1+p_1+\ldots+p_1^{n-1}\right)}{p_2^n\left(1+p_1+\ldots+p_1^{n-1}\right)+p_1^n\left(1+p_2+\ldots+p_2^{n-1}\right)} \qquad (۷)$$

در ادامه سناریوی پیشنهادی یعنی سناریوی پنالتی را معرفی می کنیم.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.4.6.2]

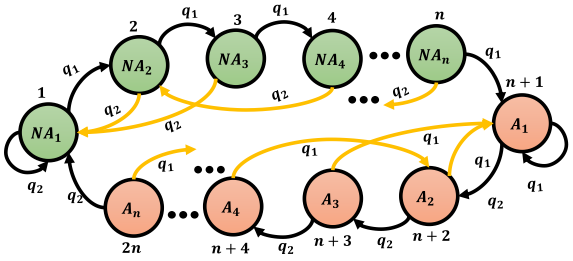
۳-۲ سناریوی پنالتی

فرض کنید که بعد از m نمونه پشت سرهم $(m < n)$ از سیگنال که بالاتر از آستانه قرار گرفته اند یک نمونه از سیگنال پایین آستانه قرار گیرد. در سناریوی ریست اثر آن m نمونه که بالاتر از آستانه قرار داشته اند نادیده گرفته شده و سیستم ریست می شود و دوباره از اول شروع به کار می کند. این تصمیم باعث می شود میزان تأخیر در وقوع هشدار افزایش یابد. در این قسمت می خواهیم مفهومی به نام پنالتی را معرفی کنیم که این مشکل را تا حدودی برطرف کند. فرض کنید پنالتی را با i نشان دهیم. در شکل ۳ مدل مارکوف مربوط به یک سیستم هشدار با n نمونه تأخیر در رخداد هشدار و n نمونه تأخیر در قطع آن با پنالتی $i = 1$ نشان داده شده است.



شکل ۳: مدل مارکوف مربوط به سناریوی پنالتی برای n نمونه تأخیر در رخداد و قطع هشدار با پنالتی $i = 1$

همان طور که در شکل ۳ مشاهده می شود، اگر بین نمونه های بالاتر از آستانه، یک نمونه پایین‌تر از آستانه قرار گیرد، بر خلاف سناریوی ریست، سیستم هشدار به حالت NA_1 ریست نمی شود بلکه یک واحد به عقب بر می گردد. به عنوان مثال، اگر در حالت NA_3 قرار داشته باشیم و نمونه بعدی پایین تر از آستانه باشد، سیستم هشدار به حالت قبلی آن یعنی NA_2 می رود نه به حالت NA_1. به طور مشابه اگر در حالت A_4 قرار داشته باشیم و نمونه بعدی پایین تر از آستانه باشد، سیستم هشدار به حالت قبلی خود یعنی A_3 می رود. این روند برای بقیه حالت ها نیز وجود خواهد داشت. حال فرض کنید پنالتی برابر $i = 2$ باشد. شکل ۴ مدل مارکوف متناظر با این حالت را نشان می دهد. با توجه به شکل ۴، در این حالت سیستم هشدار به اندازه ۲ واحد به عقب بر می گردد. به عنوان مثال اگر در حالت NA_4 قرار داشته باشیم و نمونه بعدی سیگنال پایین‌تر از آستانه باشد، سیستم هشدار به دو حالت قبلتر یعنی حالت NA_2 می رود و این روند برای بقیه حالت ها هم وجود خواهد داشت. به طور کلی اگر پنالتی برابر i باشد، سیستم هشدار به i حالت قبلتر از حالت فعلی خود ریست خواهد شد. از مقایسه شکل های ۲ تا ۴ می توان نتیجه گرفت که سناریوی ریست در واقع حالت خاصی از سناریوی پنالتی با پنالتی $i = n - 1$ می باشد. می توان دریافت که برای $i < n - 1$ میزان تأخیر در هشدار کاهش می یابد و از این طریق می توان مشکل سناریوی ریست را برطرف کرد. در ادامه تأثیر پارامتر i در شاخص‌های سیستم هشدار برای حالت کلی n نمونه تأخیر با پنالتی i بررسی می گردد.



شکل ۴: مدل مارکوف مربوط به سناریوی پنالتی برای n نمونه تأخیر در رخداد و قطع هشدار با پنالتی $i = 2$

۴- شاخص‌های سیستم هشدار در سناریوی پنالتی

در این بخش پارامترهای سیستم هشدار یعنی FAR، MAR و AAD به همراه معرفی پارامتر MTTA برای یک سیستم هشدار با پنالتی i و n نمونه تأخیر در رخداد/قطع هشدار معرفی شده و روابط مربوط به آنها استخراج می شود. این شاخص‌ها برای پنالتی $i = 1$ با استفاده از حل معادلات مارکوف در حالت ماندگار استخراج می شود و برای حالت کلی n نمونه تأخیر و پنالتی i الگوریتمی معرفی می گردد که بتوان بدون نیاز به رسم و حل مدل‌های مارکوف، شاخص‌های مختلف را محاسبه کرد.

مدل مارکوف شکل ۳ را در نظر بگیرید. این مدل، مدل شاخص FAR در حالت کلی n نمونه تأخیر با پنالتی $i = 1$ می باشد. ماتریس گذار حالت برای این شکل به صورت زیر می باشد.

$$Q = \left[\begin{array}{cccccc|cccccc} q_2 & q_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ q_2 & 0 & q_1 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & q_2 & 0 & q_1 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & q_2 & 0 & \ddots & \vdots & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & q_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & q_2 & 0 & q_1 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & q_1 & q_2 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & q_1 & 0 & q_2 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & q_1 & 0 & q_2 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & q_1 & 0 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & q_2 \\ q_2 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & q_1 & 0 \end{array}\right] \qquad (۸)$$

معادلات حالت ماندگار مارکوف را می توان به صورت زیر نوشت.

$$\Pi = \Pi \times Q \qquad (۹)$$

که در رابطه بالا $\Pi = [\pi_1 \quad \pi_2 \quad \cdots \quad \pi_{2n}]$ می باشد که π_1 تا π_{2n} احتمال هر کدام از حالت های مدل مارکوف در شکل ۲ می باشد. از معادلات (۸) و (۹) داریم:

$$I: \begin{cases} \pi_1 = q_2(\pi_1 + \pi_2 + \pi_{2n}) \\ \pi_2 = q_1\pi_1 + q_2\pi_3 \\ \pi_3 = q_1\pi_2 + q_2\pi_4 \\ \vdots \\ \pi_{n-1} = q_1\pi_{n-2} + q_2\pi_n \\ \pi_n = q_1\pi_{n-1} \end{cases}, \Pi: \begin{cases} \pi_{n+1} = q_1(\pi_{n+1} + \pi_{n+2} + \pi_n) \\ \pi_{n+2} = q_2\pi_{n+1} + q_1\pi_{n+3} \\ \pi_{n+3} = q_2\pi_{n+2} + q_1\pi_{n+4} \\ \vdots \\ \pi_{2n-1} = q_2\pi_{2n-2} + q_2\pi_{2n} \\ \pi_{2n} = q_2\pi_{2n-1} \end{cases} \qquad (۱۰)$$

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.4.6.2]

از معادلات بالا بخش *I* می توان نتیجه گرفت

$$\pi_n = \frac{q_1}{\alpha_n}\pi_{n-1}\ ,\ \ \pi_{n-1} = \frac{q_1}{\alpha_{n-1}}\pi_{n-2} \qquad (۱۱)$$

که در اینجا $\alpha_n = 1,\ \alpha_{n-1} = 1 - q_1 q_2$ و برای $2 \le k \le n-2$ داریم

$$\pi_{n-k} = \frac{q_1 \alpha_{n-(k-1)}}{\alpha_{n-k}}\pi_{n-(k+1)} \qquad (۱۲)$$
$$\alpha_{n-k} = \alpha_{n-(k-1)} - q_1 q_2 \alpha_{n-(k-2)}$$

با استفاده از روابط (۱۰) تا (۱۲) داریم

$$\sum_{k=1}^{n}\pi_k = \pi_1 + \underbrace{\left[\frac{q_1\alpha_3}{\alpha_2}\pi_1\right]}_{\pi_2} + \underbrace{\left[\frac{q_1\alpha_4}{\alpha_3}\pi_2\right]}_{\pi_3} + \underbrace{\left[\frac{q_1\alpha_5}{\alpha_4}\pi_3\right]}_{\pi_4} + \ldots + \underbrace{\left[\frac{q_1}{\alpha_{n-1}}\pi_{n-2}\right]}_{\pi_{n-1}} + \underbrace{\left[\frac{q_1}{\alpha_n}\pi_{n-1}\right]}_{\pi_n} \qquad (۱۳)$$

با استفاده مجدد از رابطه (۱۲)

$$\sum_{k=1}^{n}\pi_k = \pi_1 + \left[\frac{q_1\alpha_3}{\alpha_2}\pi_1\right] + \left[\frac{q_1\alpha_4}{\alpha_3}\times\frac{q_1\alpha_3}{\alpha_2}\pi_1\right] + \left[\frac{q_1\alpha_5}{\alpha_4}\times\frac{q_1\alpha_4}{\alpha_3}\times\frac{q_1\alpha_3}{\alpha_2}\pi_1\right] + \ldots \qquad (۱۴)$$

پس از ساده سازی، رابطه بالا به صورت زیر خواهد شد

$$\sum_{k=1}^{n}\pi_k = \pi_1\left(1 + \frac{q_1\alpha_3 + q_1^2\alpha_4 + q_1^3\alpha_5 + \ldots + q_1^{n-1}}{\alpha_2}\right) \qquad (۱۵)$$

به روشی مشابه برای معادلات (۱۰) بخش *II* می توان به روابط زیر رسید

$$\sum_{k=n+1}^{2n}\pi_k = \pi_{n+1}\left(1 + \frac{q_2\beta_{n+3} + q_2^2\beta_{n+4} + q_2^3\beta_{n+5} + \ldots + q_2^{n-1}}{\beta_{n+2}}\right) \qquad (۱۶)$$

در رابطه بالا

$$\pi_{2n} = \frac{q_2}{\beta_{2n}}\pi_{2n-1}\ ,\ \ \pi_{2n-1} = \frac{q_2}{\beta_{2n-1}}\pi_{2n-2} \qquad (۱۷)$$

که در اینجا $\beta_{2n} = 1$، $\beta_{2n-1} = 1 - q_1 q_2$ و برای $n+2 \le k \le 2n-2$ داریم

$$\pi_{2n-k} = \frac{q_2 \beta_{2n-(k-1)}}{\beta_{2n-k}}\pi_{2n-(k+1)} \qquad (۱۸)$$
$$\beta_{2n-k} = \beta_{2n-(k-1)} - q_1 q_2 \beta_{2n-(k-2)}$$

با استفاده از رابطه (۱۰) معادله اول بخش *I* می توان نوشت

$$\pi_1 = q_2\left(\pi_1 + \pi_2 + \pi_{2n}\right) \qquad (۱۹)$$

با استفاده از روابط (۱۱)، (۱۲)، (۱۷)، (۱۸) و (۱۹) داریم

$$\pi_1 = \left[\frac{\alpha_2 q_2^n}{\beta_{n+2}\left(\alpha_2 - q_2\alpha_2 - q_1 a_3\right)}\right]\pi_{n+1} \qquad (۲۰)$$

از طرفی می دانیم که مجموع احتمالات حالات مختلف مدل مارکوف برابر یک است یعنی $\sum_{k=1}^{2n}\pi_k = 1$. لذا

$$\sum_{k=1}^{2n}\pi_k = \sum_{k=1}^{n}\pi_k + \sum_{k=n+1}^{2n}\pi_k = 1 \qquad (۲۱)$$

با استفاده از روابط (۱۵)، (۱۶)، (۲۰) و (۲۱) داریم

$$\pi_{k+1} = \frac{\beta_{n+2} q_1^n}{q_2^n X_\alpha + q_1^n X_\beta} \qquad (۲۲)$$

که در رابطه بالا

$$X_\alpha = \alpha_2 + q_1\alpha_3 + q_1^2\alpha_4 + q_1^3\alpha_5 + \ldots + q_1^{n-1}$$
$$X_\beta = \beta_{n+2} + q_2\beta_{n+3} + q_2^2\beta_{n+4} + q_2^3\beta_{n+5} + \ldots + q_2^{n-1} \qquad (۲۳)$$
$$\alpha_2 - q_2\alpha_2 - q_1 a_3 = q_1^n$$

با استفاده از روابط (۱۸)، (۲۲) و (۲۳)، شاخص FAR برابر است با

$$FAR = \sum_{k=n+1}^{2n}\pi_k = \pi_{n+1}\left(\frac{X_\beta}{\beta_{n+2}}\right) = \frac{q_1^n X_\beta}{q_2^n X_\alpha + q_1^n X_\beta} \qquad (۲۴)$$

که در رابطه بالا

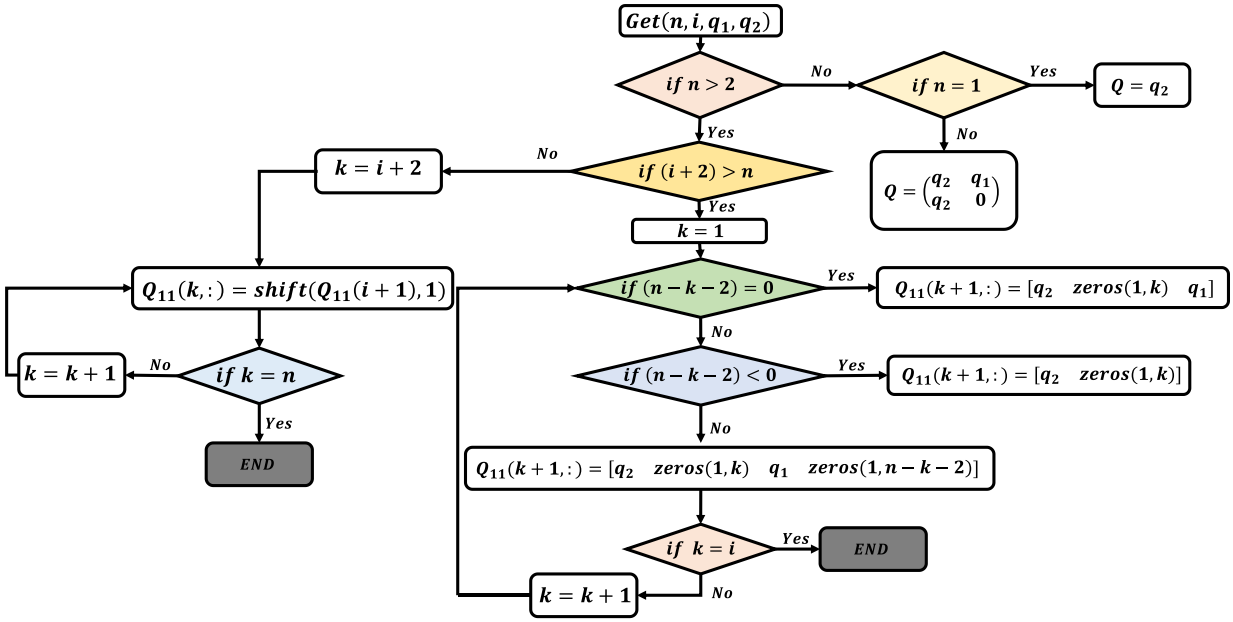
$$X_\beta = \left(1 + \sum_{r=0}^{n-2}\left[\sum_{j=(r+1)}^{(r+1)} q_2^j\left(\sum_{m=0}^{r+1}(-1)^m C_m^\theta q_1^m\right)\right]\right)$$
$$X_\alpha = \left(1 + \sum_{r=0}^{n-2}\left[\sum_{j=(r+1)}^{(r+1)} q_1^j\left(\sum_{m=0}^{r+1}(-1)^m C_m^\theta q_2^m\right)\right]\right) \qquad (۲۵)$$

که در رابطه بالا

$$C_m^\theta = \frac{\theta!}{m!(\theta-m)!},\quad \theta = (n-j-1) \qquad (۲۶)$$

در حالت کلی، حل مسأله برای n نمونه تأخیر و پنالتی i پیچیده خواهد شد. لذا در این مقاله، الگوریتم نشان داده شده در شکل ۵ برای استخراج شاخص‌های سیستم هشدار پیشنهاد می گردد. اگر فرض کنیم که ماتریس گذار متناظر با مدل مارکوف به صورت زیر باشد

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.4.6.2]



شکل ۵: فلوچارت پیشنهادی برای استخراج ماتریس Q_{11}

$$Q=\begin{pmatrix} Q_{11} & Q_{12} \\ Q_{21} & Q_{22} \end{pmatrix} \quad (۲۷)$$

ماتریس Q_{11} را می توان با توجه به الگوریتم شکل ۵ استخراج کرد. با جایگزینی q_1 با q_2 و q_2 با q_1 در ماتریس Q_{11} ماتریس Q_{22} نیز بدست می آید. درایه های ماتریس‌های Q_{12} و Q_{21} نیز همگی صفر هستند به جز $Q_{12}(n,1)=q_1$ و $Q_{21}(n,1)=q_2$. با داشتن ماتریس گذار برای حالت عمومی n نمونه تأخیر و پنالتی i، می توان شاخص FAR را به صورت زیر محاسبه کرد. تعریف می کنیم

$$A=I_{2n\times 2n}-Q \quad (۲۸)$$

که در رابطه بالا $I_{2n\times 2n}$ ماتریس قطری واحد است. احتمال ماندگار حالات مختلف مدل مارکوف به صورت زیر محاسبه می گردد

$$\mathrm{P}=e^{A_1}P_0 \quad (۲۹)$$

که در رابطه بالا، $P=[P_1,\ldots,P_{2n}]$، $P_0=[1\ \underbrace{0\ldots 0}_{2n-1}]$ و A_1 همان ماتریس A است که درایه های سطر اول آن همگی یک هستند. در نتیجه شاخص FAR برای سناریوی پنالتی با n نمونه تأخیر به صورت زیر محاسبه می گردد

$$FAR=\sum_{k=n+1}^{2n}P_k \quad (۳۰)$$

برای محاسبه شاخص MAR، کافی است در مدل‌های مارکوف به جای q_1 و q_2 به ترتیب p_1 و p_2 قرار دهیم که p_2 با توجه به رابطه (۲) محاسبه می گردد و $p_1=1-p_2$. به روشی مشابه آنچه برای محاسبه FAR بیان شد، می توان ماتریس گذار مربوط به شاخص MAR را به صورت زیر به دست آورد

$$P=\begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{pmatrix} \quad (۳۱)$$

حال تعریف می کنیم

$$B=I_{2n\times 2n}-P \quad (۳۲)$$

که در رابطه بالا $I_{2n\times 2n}$ ماتریس قطری واحد است. احتمال ماندگار حالات مختلف مدل مارکوف به صورت زیر محاسبه می گردد

$$P_m=e^{B_1}P_{m_0} \quad (۳۳)$$

که در رابطه بالا، $P_m=[P_{m_1},\ldots,P_{m_{2n}}]$، $P_{m_0}=[1\ \underbrace{0\ldots 0}_{2n-1}]$ و B_1 همان ماتریس B است که درایه های سطر اول آن همگی یک هستند. در نتیجه شاخص FAR برای سناریوی پنالتی با n نمونه تأخیر به صورت زیر محاسبه می گردد

$$FAR=\sum_{k=1}^{n}P_{m_k} \quad (۳۴)$$

شاخص دیگری که در تحلیل یک سیستم هشدار به کار می رود، شاخص AAD است. در شکل ۶، مدل مارکوف متناظر با شاخص AAD نشان داده شده است. در مرجع [۱۴] شاخص AAD برای سناریوی ریست محاسبه شده است اما محاسبه این شاخص برای سناریوی پنالتی با استفاده از روش مرجع [۱۴] تا حدودی پیچیده است لذا در این مقاله شاخص دیگری تحت عنوان MTTA معرفی می گردد، سپس شاخص AAD با توجه به آن محاسبه می گردد. نحوه محاسبه شاخص MTTA به صورت یک قضیه در ادامه بیان می شود.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.4.6.2]

قضیه ۱:

با توجه به مدل مارکوف رسم شده در شکل ۶، ماتریس گذار حالت P را می توان به صورت زیر در نظر گرفت

$$P=\begin{pmatrix} Q' & R \\ 0 & I \end{pmatrix} \quad (۳۵)$$

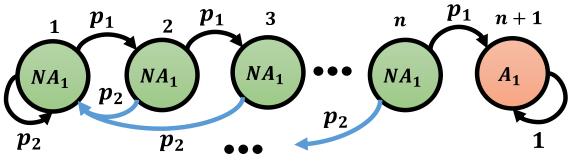
در اینصورت شاخص AAD به صورت زیر تعریف می شود

$$AAD=h\left(MTTA-1\right) \quad (۳۶)$$

که در آن h زمان نمونه برداری و

$$MTTA=\sum_{k=1}^{n}N_{1k} \quad (۳۷)$$

که در اینجا N_{1k} درایه های سطر اول ماتریس $N=(I-Q')^{-1}$ است.



شکل ۶: مدل مارکوف متناظر با شاخص AAD در سناریوی ریست [۱۴].

اثبات قضیه ۱:

مدل مارکوف ارائه شده برای ارزیابی شاخص AAD در شکل ۶ یک مدل مارکوف جاذب است که به کمک ماتریس انتقال گسسته حالت P توصیف می‌گردد. این مدل دارای یک حالت جاذب (حالت مربوط به هشدار) و n حالت غیر جاذب می‌باشد. در این مدل ماتریس P را می‌توان به فرم کانونیکال رابطه (۳۵) نوشت که در آن Q' ماتریس انتقال شامل گذرها از هر حالت غیر جاذب به حالت غیر جاذب دیگر بوده و R ماتریس شامل گذرها از هر حالت غیر جاذب به حالت جاذب است. لازم به ذکر است که در این مسئله به دلیل وجود تنها یک حالت جاذب I در رابطه (۳۵) برابر یک خواهد بود. با داشتن ماتریس انتقال گسسته به فرم کانونیکال می‌توانیم ماتریس بنیادی را به صورت $N=(I-Q)^{-1}$ تعریف نماییم[۲۶]. بردار t را در نظر بگیرید که به کمک رابطه (۳۸) تعریف شده باشد که در آن C برداری ستونی است که تمام درایه‌های آن یک باشند. هر درایه از بردار t بیانگر میانگین گام‌هایی است که بین حالت‌های غیر جاذب پیموده می‌شود تا از یک حالت غیر جاذب مشخص به حالت جاذب برسد.

$$t=\left[t\left(NA_1\right)\ \ t\left(NA_2\right)\ \ \ldots\ \ t\left(NA_n\right)\right]^T=NC \quad (۳۸)$$

حال اگر بخواهیم میانگین زمان تا وقوع هشدار را به دست آوریم کافی است که زمان از حالت غیر جاذب اول به حالت جاذب را محاسبه کنیم.

بنابراین شاخص MTTA یک سیستم هشدار دارای n نمونه وقفه به صورت رابطه زیر تعریف می‌گردد.

$$MTTA=t\left(NA_1\right) \quad (۳۹)$$

مرجع [۱۴]، شاخص AAD را به صورت زیر درنظر گرفته است

$$AAD=\bar{T}_d=E\left(T_d\right)=h\left(E\left(T_{1,n+1}\right)-1\right) \quad (۴۰)$$

که در آن $E(T_{1.n+1})$ میانگین گام‌های طی شده از حالت اول یعنی NA_1 به حالت جاذب A_1 می‌باشد. ما رابطه (۴۰) را بر حسب شاخص جدید MTTA به صورت زیر بازنویسی می کنیم

$$AAD=\bar{T}_d=h\left(MTTA-1\right) \quad (۴۱)$$

که شاخص MTTA نیز با استفاده از ماتریس بنیادی $N=(I-Q)^{-1}$ و رابطه (۳۹) قابل محاسبه است. □

با استفاده از قضیه ۱ برای محاسبه شاخص MTTA در سناریوی پنالتی، کافی است ماتریس گذار مربوط به پنالتی مورد نظر را تشکیل بدهیم که این کار با استفاده از الگوریتم شکل ۵ به راحتی ممکن است. سپس با استفاده از رابطه $N=(I-Q)^{-1}$ و رابطه (۳۷) می توان شاخص MTTA را محاسبه کرد. توجه به این نکته لازم است که در اینجا فرض شده است که زمان تأخیر در رخداد هشدار از حالت NA_1 شروع می شود اما در حالت کلی لحظه شروع می تواند هر کدام از حالت های NA در شکل ۶ باشد. با توجه به ماتریس بنیادی N، از جمع درایه‌های سطری این ماتریس می توان متوسط زمانی هر کدام از حالت‌ها را محاسبه کرد.

۵- بررسی عملکرد سناریوی پنالتی و مقایسه آن با سناریوی ریست

در این قسمت شاخص‌های MAR،FAR و MTTA برای یک مثال برای پنالتی‌های مختلف محاسبه شده و با هم مقایسه می گردد. فرض کنید برای یک سیگنال گسسته اتفاقی $x(t)$، با آستانه $x_{tp}=4$ پس از جداسازی داده های نرمال و غیرنرمال و تخمین توابع توزیع احتمال آنها، مقادیر q_1 و p_2 در (۱) و (۲) به صورت $q_1=0.32$ و $p_2=0.35$ به دست آمده است. در ادامه تأثیر تغییر پارامترهای n، i و آستانه x_{tp} را بر شاخص‌های FAR، MAR و MTTA مورد بررسی قرار می دهیم.

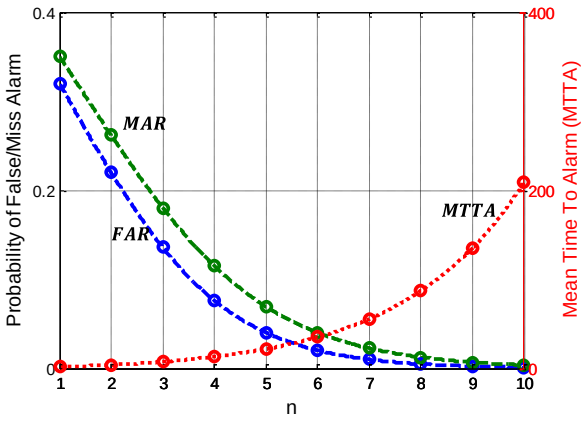
۵-۱- تأثیر تغییرات n بر شاخص های عملکردی سیستم هشدار

ابتدا فرض کنید که $i=n-1$ باشد یعنی سیستم هشدار بر مبنای سناریوی ریست طراحی شده باشد. در شکل ۷ اثر افزایش n (تعداد تأخیر) بر شاخص‌های سیستم هشدار نشان داده شده است.

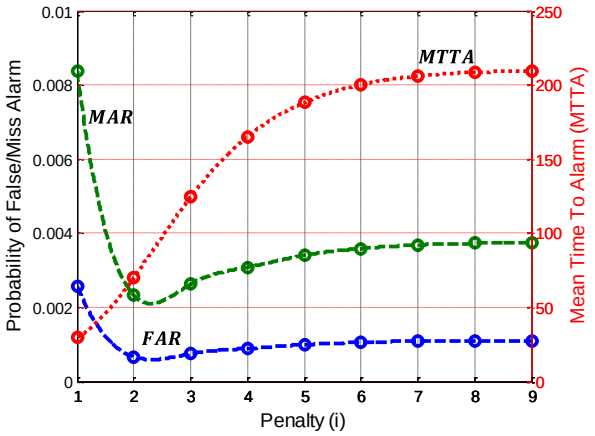
شکل ۷ نشان می دهد که افزایش n منجر به کاهش شاخص‌های FAR و MAR و افزایش شاخص MTTA می شود. همان طور که قبلاً هم اشاره شده بود، کوچک بودن مقادیر پارامترهای سیستم هشدار نشان دهنده

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.4.6.2]

عملکرد بهتر آن است ولی با توجه به این نتایج می بینیم که نمی توان هر سه شاخص را با هم کمینه کرد زیرا کاهش شاخص‌های FAR و MAR با افزایش شاخص MTTA همراه است.



شکل ۷: تأثیر افزایش تعداد تأخیر بر شاخص‌های سیستم هشدار.



شکل ۸: تأثیر افزایش پنالتی بر شاخص‌های سیستم هشدار.

۵-۲- تأثیر تغییرات پنالتی i بر شاخص های عملکردی سیستم هشدار

در ادامه اثر افزایش پنالتی بر پارامترهای سیستم هشدار را مورد ارزیابی قرار می دهیم. فرض کنید تعداد نمونه های تأخیر ثابت بوده و پنالتی متغیر باشد. در شکل ۸، برای حالتی که $n = 10$ است و پنالتی به صورت $i = 1,\ldots,9$ متغیر باشد، تأثیر افزایش پنالتی بر عملکرد سیستم نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود با افزایش پنالتی هم پارامتر های FAR و MAR کاهش یافته و پارامتر MTTA افزایش می یابد. اما نکته ای که وجود دارد این است که برای پنالتی های $i > 2$ مقادیر این پارامترها کوچکتر از حالتی است که پنالتی $i = 1.2$ باشد. در واقع اینجاست که برتری سناریوی پنالتی را می توان مشاهده کرد. به عنوان مثال برای حالتی که $n = 10$ باشد، با استفاده از سناریوی ریست مقداری که برای پارامترهای سیستم هشدار به دست می آید برابر است با حالتی که پنالتی برابر $i = n - 1 = 9$ باشد که با توجه به شکل ۸، این مقادیر برابر است با $MTTA = 209.3688$,$MAR = 0.0037$، $FAR = 0.0005$ در حالی که برای پنالتی $i = 1$ این مقادیر برابر است با $MTTA = 29.4$ ، $FAR = 0.0011$ و $MAR = 0.0084$ و برای پنالتی $i = 2$ این مقادیر برابر است با $MTTA = 69.9$,$FAR = 0.0003$ ، $MAR = 0.0023$ ، بنابراین می توان با تغییر پنالتی به نتایج مطلوب تری رسید. اگر در طراحی سیستم، پارامتر MTTA از اهمیت بیشتری برخوردار است، در این مثال می توان پنالتی یک را انتخاب کرد و اگر مقادیر FAR و MAR برای سیستم هشدار مهمتر هستند می توان پنالتی دو را انتخاب کرد.

یکی از مزیت‌های سناریوی پنالتی این است که با کاهش تعداد پنالتی‌ها، می توان شاخص AAD را کاهش داد در حالی که شاخص‌های FAR و MAR هم کاهش می یابند و یا حداقل تغییر چندانی نسبت به حالت ریست نخواهند داشت. این در حالی است که در سناریوی ریست برای کاهش شاخص AAD لازم است تعداد تأخیرها یعنی n کاهش پیدا کند که این کاهش موجب افزایش شاخص‌های دیگر خواهد شد. برای اعتبار سنجی مقادیر AAD در پنالتی‌های مختلف، سیگنال فرضی زیر در نظر گرفته شده است

$$x(t) = \begin{cases} N(1,1) & ,t < t_0 \\ N(3,1) & ,t \geq t_0 \end{cases} \qquad (۴۲)$$

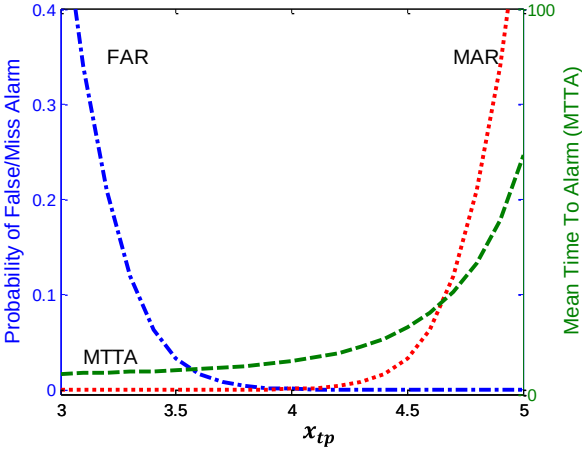
فرض می‌شود در لحظه $t_0 = 1000h$ که $h = 1\ sec$، عیبی رخ داده و سیگنال تغییر می کند. همچنین فرض می شود که آستانه برای این سیگنال $x_{tp} = 2$ می باشد. با استفاده از تحلیل مدل‌های مارکوف مقادیر شاخص MTTA در پنالتی‌های مختلف به صورت نشان داده شده در شکل ۹ به دست می‌آید. برای صحت سنجی نتایج به دست آمده، تعداد ۲۰۰۰ تحقق مستقل از سیگنال (۴۲) تولید شده و با استفاده از روش مونت کارلو مقادیر MTTA محاسبه شده است. این نتایج با نتایج به دست آمده از تحلیل مارکوف در شکل ۹ مقایسه شده است. همان طور که مشاهده می شود نتایج تحلیلی به نتایج واقعی نزدیک است.

۵-۳- تأثیر تغییرات آستانه x_{tp} بر شاخص های عملکردی سیستم هشدار

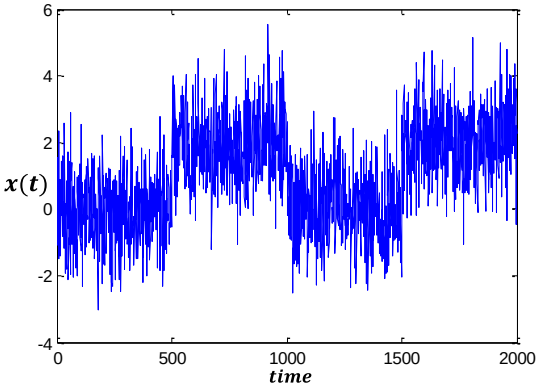
علاوه بر مقادیر n و i، پارامترهای دیگری نیز می تواند در عملکرد سیستم هشدار تأثیرگذار باشد. با توجه به روابط (۱) و (۲)، تغییرات آستانه یعنی x_{tp} هم می تواند باعث تغییر مقادیر q_1 و p_2 گردد که در نتیجه آن، مقادیر FAR، MAR و MTTA نیز تغییر می کند. در شکل ۹ تأثیر تغییرات پارامتر x_{tp} بر شاخص های سیستم هشدار مورد بررسی قرار گرفته است. همچنانکه انتظار می رفت با کاهش حد آستانه، تعداد هشدار های نادرست افزایش یافته و تعداد هشدار های از دست رفته کاهش می یابد. بعلاوه با کاهش حد آستانه، مقدار متوسط زمان تا هشدار نیز کاهش پیدا می کند.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.4.6.2]

در ادامه با ارائه یک مثال عددی، به بررسی تأثیر تغییرات پارامترهای مختلف بر شاخص های سیستم هشدار می پردازیم.



شکل ۹: تأثیر تغییرات آستانه x_{tp} بر شاخص‌های سیستم هشدار



شکل ۱۰: سیگنال $x(t)$ در مثال ۱

مثال ۱:

یک سیستم هشدار با مشخصات عملکردی $FAR < 0.05$، $MAR < 0.05$ و $AAD < 5\ sec$ برای سیستمی با خروجی سیگنال $x(t)$ با پروفایل زیر طراحی کنید.

$$\begin{cases} x(t) \sim N(0,1) & ,t < 500 \\ x(t) \sim N(2,1) & ,500 \le t < 1000 \\ x(t) \sim N(0,1) & ,1000 \le t \le 1500 \\ x(t) \sim N(2,1) & ,1500 \le t \le 2000 \end{cases} \quad (۴۳)$$

فرض کنید آستانه برابر $x_{tp} = 1$ انتخاب شود، پس از جداسازی داده های نرمال و غیر نرمال و تخمین تابع توزیع احتمال مربوط به هرکدام بر اساس مرجع [۱۴]، مقادیر $q_1 = 0.1550$ و $p_2 = 0.1453$ به دست می آید. برای شروع، الگوریتم پیشنهادی این مقاله را با مقادیر عددی فوق برای حالت $n = 6$ و پنالتی های $i = 1.2. \ldots .5$ اجرا می کنیم. نتایج مندرج در جدول ۱ حاصل می شود.

با توجه به جدول ۱، مشاهده می شود که برای حالت $n = 6$، در حالتی که پنالتی برابر $i = 1$ است، پارامتر AAD کمترین مقدار خود را دارد و برای پنالتی $i = 2$، پارامترهای FAR و MAR کمترین مقدار را دارند. مقادیری که برای پنالتی $i = 5$ به دست آمده است در واقع همان نتایجی است که از سناریوی ریست برای این مثال به دست می آید. مشاهده می شود که برای پنالتی های $i < 5$ یا همان سناریوی پنالتی ، پارامترهای سیستم هشدار مقادیر کوچکتری دارند و این یعنی اینکه عملکرد سناریوی پنالتی از سناریوی ریست بهتر است. با توجه به نتایج جدول ۱ می بینیم که در همه حالت ها پارامتر AAD از ۵ ثانیه بیشتر است و سیستم هشدار طراحی شده، اهداف عملکردی سیستم هشدار را برآورده نمی کند. این بدان معنی است که انتخاب تعداد تأخیر $n = 6$ در ابتدای کار مناسب نبوده است و مسأله را بایستی بازطراحی کرد. با توجه به شکل ۷ دیدیم که با افزایش n مقدار MTTA نیز افزایش می یابد، بنابراین نتیجه می گیریم که برای کم کردن مقدار MTTA بایستی تعداد تأخیرهای سیستم هشدار را کاهش دهیم. در جدول ۲ پارامترهای سیستم هشدار برای حالت $n = 4$ و پنالتی های مختلف نشان داده شده است.

جدول ۱: پارامترهای سیستم هشدار در مثال۱ برای حالت $n = 6$ و پنالتی های مختلف

i	FAR	MAR	$MTTA$	AAD
1	1.79×10^{-4}	1.16×10^{-4}	8.16	7.16
2	1.19×10^{-4}	7.87×10^{-5}	9.29	8.29
3	1.24×10^{-4}	8.1×10^{-5}	10.10	9.10
4	1.29×10^{-4}	8.50×10^{-5}	10.57	9.57
5	1.32×10^{-4}	8.66×10^{-5}	10.77	9.77

جدول ۲: پارامترهای سیستم هشدار در مثال۱ برای حالت $n = 4$ و پنالتی های مختلف

i	FAR	MAR	$MTTA$	AAD
1	0.0035	0.0026	5.3501	4.3501
2	0.0030	0.0022	5.8188	4.8155
3	0.0030	0.0023	6.0144	5.0144

با توجه به جدول ۲، در حالت $n = 4$ و پنالتی $i = 1$ و یا $i = 2$، اهداف مورد نظر برای سیستم هشدار برآورده می شود. توجه کنید که اگر پارامتر AAD در سیستم هشدار از اهمیت بیشتری برخوردار باشد، می توان با انتخاب n کوچکتر این پارامتر را کاهش داد ولی توجه کنید که با توجه به شکل ۷، در مقابل پارامترهای FAR و MAR افزایش خواهند یافت و بایستی این نکته را مورد توجه قرار داد.

همان طور که در مثال ۱ و شکل های ۷ تا ۹ دیدیم، بایستی پارامترهای n ، i و x_{tp} را تنظیم کرد تا بتوان به شاخص‌های MAR،FAR و AAD یا MTTA مطابق با اهداف مورد نظر برای سیستم هشدار رسید. از طرفی دیدیم که با کاهش یا افزایش پارامتر AAD، پارامترهای FAR و MAR نیز تغییر می کنند، بنابراین برای سهولت در طراحی سیستم هشدار می توان از الگوریتم های بهینه سازی برای تنظیم

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.4.6.2]

پارامترهای سیستم هشدار استفاده کرد. از این رو، در بخش بعدی یک روش سیستماتیک برای طراحی سیستم هشدار با استفاده از الگوریتم ژنتیک ارائه خواهد شد.

۶- ارائه یک روش سیستماتیک برای طراحی سیستم هشدار

با توجه به مباحثی که در بخش های قبل مطرح شد. برای طراحی یک سیستم هشدار ابتدا بایستی مقادیر q_1 و p_2 را تعیین نمود. برای این کار بایستی ابتدا داده های نرمال و غیرنرمال را جدا نموده و پس از تخمین توابع توزیع احتمال مربوط به هرکدام از بخش های نرمال و غیرنرمال، با استفاده از روابط (۱) و (۲) این مقادیر را تعیین کرد. در این مقاله برای دسته بندی داده های نرمال و غیر نرمال از روش ارائه شده در [۱۴] که مبتنی بر روش تشخیص نقطه تغییر میانگین[1] [۲۱] است، استفاده می شود و سپس از روش تخمین تابع چگالی کرنل [۲۲-۲۴] برای تخمین توابع توزیع احتمال استفاده می شود. برای آشنایی خواننده با روش تشخیص نقطه تغییر میانگین، آن را به اجمال در زیر توضیح می دهیم.

۶-۱- روش تشخیص نقطه تغییر میانگین برای جداسازی داده های نرمال و غیرنرمال

فرض کنید T نمونه از سیگنال گسسته و تصادفی $\{x(t)\}_{t=1}^{T}$ را داریم. برای تشخیص نقطه تغییر میانگین، مراحل زیر پیموده می شود.

مرحله ۱: ابتدا سیگنال های تست $U_{t.T}$ و $V_{t.T}$ را به صورت زیر محاسبه می کنیم

$$\begin{cases} U_{1.T} = V_{1.T} \\ U_{t.T} = U_{t-1.T} + V_{t.T} \end{cases} . \; t = 2.3....T \qquad (۴۴)$$

که در رابطه بالا

$$V_{t.T} = \sum_{j=1}^{T} sgn\left(x(t) - x(j)\right) \qquad (۴۵)$$

که در رابطه بالا sgn تابع علامت است.

مرحله ۲: مقدار پارامتر P را با توجه به بیشترین مقدار سیگنال تست $|U_{t.T}|$ به صورت زیر محاسبه می کنیم

$$P = 2exp\left(\frac{-6\,max_{1\le t\le T}\left|U_{t.T}\right|^2}{T^2 + T^3}\right) \qquad (۴۶)$$

حال خطای نوع اول آلفا[2] را برای فرضیه خود (نقطه $x(t_{max})$ نقطه تغییر سیگنال $x(t)$ است) برابر $\alpha = 0.01$ در نظر می گیریم که در آن t_{max} متناظر با بزرگترین مقدار سیگنال $|U_{t.T}|$ است. واضح است که اگر $P < \alpha$ باشد، نقطه $x(t_{max})$ نقطه تغییر سیگنال $\{x(t)\}_{t=1}^{T}$ است و اگر $P > \alpha$ باشد نقطه تغییری برای سیگنال $\{x(t)\}_{t=1}^{T}$ وجود ندارد.

مرحله ۳: اگر $P < \alpha$ باشد، در اینصورت سیگنال $\{x(t)\}_{t=1}^{T}$ به دو بخش $\{x_1(t)\}_{t=1}^{t_{max}}$ و $\{x_2(t)\}_{t_{max}}^{T}$ تقسیم می شود و برای هر کدام از سیگنال های $x_1(t)$ و $x_2(t)$ دوباره مراحل ۱ و ۲ را تکرار می کنیم تا زمانیکه دیگر نقطه ی تغییری برای سیگنال $x(t)$ پیدا نشود.

مرحله۴ : پس از یافتن همه نقاط تغییر در مرحله ۳، سیگنال $x(t)$ به بخش های مختلفی تقسیم می شود. فرض کنید یکی از بخش های سیگنال $x(t)$ به صورت، $\{x(t)\}_{t=t_0}^{t_1}$ باشد. برای این بخش از سیگنال مقادیر t،$\overline{x}$ و s را به صورت زیر محاسبه می کنیم

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{t=t_0}^{t_1}\left(x(t) - \overline{x}\right)^2}{t_1 - t_0}},\; \overline{x} = \frac{\sum_{t=t_0}^{t_1} x(t)}{t_1 - t_0 + 1},\; t = \frac{\overline{x} - x_{tp}}{s}\sqrt{t_1 - t_0} \qquad (۴۷)$$

که در اینجا x_{tp} همان آستانه است. فرض کنید بزرگ تر بودن نمونه های سیگنال $x(t)$ از x_{tp} حالت غیرنرمال باشد. حال خطای نوع اول بتا[3] را برای فرضیه (بخش مورد نظر سیگنال $x(t)$ نرمال است) برابر $\beta = 0.05$ تعریف می کنیم. واضح است که اگر $t > \beta$ باشد، بخش $\{x(t)\}_{t=t_0}^{t_1}$ به عنوان غیرنرمال و اگر $t < \beta$ باشد، $\{x(t)\}_{t=t_0}^{t_1}$ به عنوان داده نرمال در نظر گرفته می شود. این مرحله را برای تمامی قسمت های سیگنال $x(t)$ در مرحله ۳ تکرار می کنیم تا وضعیت نرمال و یا غیرنرمال بودن هر کدام از بخش ها مشخص شود. در نهایت بخش های نرمال را با هم و بخش های غیرنرمال را نیز با هم در یک دسته قرار می دهیم. بدین ترتیب بخش های نرمال و غیر نرمال سیگنال $x(t)$ مشخص می شود.

۶-۲- تخمین توابع توزیع احتمال

پس از دسته بندی داده های نرمال و غیر نرمال، حال می توان توابع توزیع احتمال مربوط به این داده ها را تخمین زد. روش های متفاوتی در مراجع مانند [۲۲-۲۴] برای تخمین تابع توزیع احتمال وجود دارد و در نرم افزار متلب[4] هم جعبه ابزار مشخصی برای این منظور اختصاص داده شده است. در این مقاله از روش های مبتنی بر کرنل[5] و توابع گوسی کرنل[6] استفاده می شود. پس از تخمین توابع توزیع احتمال $q(x)$ و $p(x)$ در شکل ۲، می توان با استفاده از روابط (۱) و (۲) مقادیر q_1 و p_2 را تعیین نمود.

۶-۳- ارائه روشی برای محاسبه پارامترهای بهینه سیستم هشدار با استفاده از الگوریتم ژنتیک

[1] Mean-Change Point Detection
[2] Type I error α
[3] Type I error β
[4] Matlab
[5] Kernel-based method
[6] Gaussian kernel function

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.4.6.2]

پس از محاسبه q_1 و p_2، حال سوال این است که، مقادیر n، i و حتی x_{tp} را چگونه انتخاب کنیم تا عملکرد سیستم هشدار مطلوب باشد. در این بخش می خواهیم با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ژنتیک، روشی برای انتخاب مقادیر بهینه n، i و x_{tp} ارائه دهیم. برای این منظور ابتدا یک تابع هزینه[1] به صورت زیر در نظر می گیریم

$$J\left(x_{tp}.n.i\right)=\propto_1 \frac{FAR\left(n.i.x_{tp}\right)}{l_{FAR}}+\propto_2 \frac{MAR\left(n.i.x_{tp}\right)}{l_{MAR}} + \propto_3 \frac{AAD\left(n.i.x_{tp}\right)}{l_{AAD}} \qquad (۴۸)$$

که در رابطه بالا $\propto_i$ ها مقادیری اسکالر و مثبت هستند، l_{FAR}، l_{MAR} و l_{AAD} ضرایبی هستند که معرف کران های قابل قبول برای پارامترهای سیستم هشدار می باشند و FAR، MAR و AAD نیز پارامترهای سیستم هشدار هستند. برای استفاده از رابطه بالا داشتن پارامترهای FAR، MAR و AAD به صورت تابعی از n، i و x_{tp} ضروری است که این توابع با استفاده از الگوریتم ارائه شده در این مقاله بر مبنای فلوچارت شکل (۱۱) به سادگی امکان پذیر است. بنابراین مقادیر بهینه برای طراحی سیستم هشدار به صورت

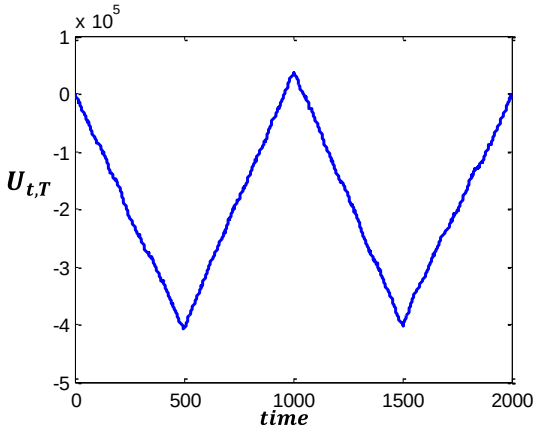
$$\left(x_{tp}.n.i\right)=\arg min\left(J\left(x_{tp}.n.i\right)\right) \qquad (۴۹)$$

قابل بیان است و از کمینه کردن تابع هزینه فوق می توان پارامترهای بهینه را به دست آورد. با داشتن تابع هزینه می توان از الگوریتم های مختلف بهینه سازی استفاده کرد. در این مقاله از الگوریتم ژنتیک برای تعیین بهینه پارامترهای سیستم هشدار استفاده شده است. برای آشنایی با الگوریتم ژنتیک می توان به [۲۵] مراجعه کرد ولی به طور خلاصه در الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک ابتدا جمعیت اولیه به صورت تصادفی ایجاد می‌گردد که در مسئله بهینه‌سازی سیستم هشدار، جمعیت ایجاد شده در واقع متشکل از مقدار آستانه، تعداد نمونه‌های تأخیر و میزان جریمه درنظر گرفته شده است. در اولین اجرا از الگوریتم، جمعیت اولیه تولید شده به تابع تناسب داده می‌شوند و برای هر عضو از این جمعیت یک مقدار به عنوان ضریب تناسب در نظر گرفته می‌شود. بعد آن اعضای جمعیت براساس ضریب تناسب چیده شده و درصدی از اعضا که پایین‌ترین میزان ضریب تناسب را دارند حذف می‌گردند. درصدی دیگر با یکدیگر ترکیب شده و نسل جدید را تشکیل می‌دهند. لازم به ذکر است که در این میان به اندازه درصد تعیین شده برای جهش جمعیت جدید تولید و به نسل جدید اضافه می‌گردد. روند ذکر شده تا زمانی که شرط اتمام برآورده نشود ادامه خواهد یافت. در نهایت پس از خارج شدن از حلقه تکرار عضوی که بیشتری ضریب تناسب یا بهینه‌ترین میزان برای مسئله را کسب نموده است به عنوان پاسخ بهینه انتخاب می گردد.

[1] Cost Function

مثال ۲:

در این مثال می خواهیم الگوریتم معرفی شده در بخش ۶-۱ این مقاله برای جداسازی داده های نرمال و غیرنرمال را برای مثال ۱ انجام دهیم. اگر $|U_{t.T}|$ را برای داده های $x(1:2000)$ به دست آوریم، خواهیم دید که بیشترین مقدار آن در $t_{max}=499$ خواهد بود که در شکل ۱۱ هم نشان داده شده است. مقدار P در رابطه (۴۶) برابر $P=2.6602\times10^{-60}$ به دست می آید که چون $P<\alpha$ می باشد، پس این نقطه یک نقطه تغییر میانگین برای سیگنال $x(t)$ می باشد. اگر همین روش را برای داده های $x(1:499)$ تکرار کنیم مقدار P بزرگتر از α به دست می آید و در نتیجه در این بازه نقطه تغییر میانگین وجود نخواهد داشت. حال برای داده های $x(500:2000)$ بیشترین مقدار $|U_{t.T}|$ در $t_{max}=1501$ اتفاق می افتد که مقدار P در این حالت کوچکتر از $\alpha=0.01$ و برابر $P=3.5190\times10^{-35}$ است. بنابراین نقطه $x(1501)$ هم یک نقطه تغییر میانگین است. با ادامه این روند مشاهده می شود که برای داده های $x(1501:2000)$ نقطه تغییری وجود ندارد ولی برای داده های $x(500:1501)$ یک نقطه تغییر در $t_{max}=1001$ وجود دارد که مقدار P در این حالت $P=1.1757\times10^{-116}$ به دست می آید. بنابراین سه نقطه تغییر میانگین در 499،1001 و 1501 خواهیم داشت و سیگنال $x(t)$ به چهار قسمت به صورت $x(1:499)$، $x(500:1001)$، $x(1002:1501)$ و $x(1502:2000)$ تقسیم می شود. اگر برای هر کدام از این قسمت ها، مقادیر $t.\overline{x}$ و s در رابطه (۴۷) را محاسبه کنیم. نرمال و یا غیرنرمال بودن هر قسمت مطابق با جدول ۳ تعیین می شود.



شکل ۱۱: سیگنال $U_{t,T}$ برای $x(1:2000)$

جدول ۳: قسمت های نرمال و غیرنرمال سیگنال $x(t)$

Normal Data	*Abnormal Data*
$x(1:499)$	$x(500:1001)$
$x(1002:1501)$	$x(1502:2000)$

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.4.6.2]

جدول ۴: شاخص های عملکردی در سناریوی ریست [۱۴]

پارامترهای سیستم هشدار		شاخص های عملکردی		
n	x_{tp}	MAR	FAR	AAD
2	23.6	0.0305	0.0468	1.4294
3	23.6	0.0060	0.0116	2.8988
4	23.6	0.0010	0.0025	4.5694

جدول ۵: شاخص های عملکردی در الگوریتم پیشنهادی (سناریوی پنالتی)

پارامترهای تابع هزینه در الگوریتم ژنتیک			پارامترهای سیستم هشدار	شاخص های عملکردی		
			(x_{tp}, n, i)	MAR	FAR	AAD
α_1	α_2	α_3	(23.5999, 2, 1)	0.027576	0.041961	1.4052
1000	1000	1000				
l_{FAR}	l_{MAR}	l_{AAD}				
1e-3	1e-3	1e-2				
α_1	α_2	α_3	(23.6854, 3,2)	0.005402	0.010386	2.6999
500	1000	100				
l_{FAR}	l_{MAR}	l_{AAD}				
1e-5	1e-5	1e-2				
α_1	α_2	α_3	(23.5967, 4,2)	0.000943	0.0022	3.3997
500	1000	20				
l_{FAR}	l_{MAR}	l_{AAD}				
1e-5	1e-5	0.1				

مثال ۳:

در این مثال عملکرد سیستم هشدار مبتنی بر سناریوی ریست و الگوریتم پیشنهادی پنالتی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک مورد بررسی قرار می گیرد. برای مقایسه عملکرد الگوریتم پیشنهادی با الگوریتم ریست، داده مربوط به سنسور فشار توربینِ نیروگاه بخار Weifang Shandong Province کشور چین[۱۴] را در نظر گرفته و نتایج حاصله از سناریوی پنالتی و سناریوی ریست با هم مقایسه می شود. در شکل ۱۲ داده مربوط به سنسور اندازه گیری فشار برای یک بازه زمانی ۱۹ ساعته نشان داده شده است. در این مثال اگر فشار از سطح $x_{tp} = 23.6$ پایین تر قرار گیرد، هشدار تولید می شود. اگر الگوریتم تغییر نقطه میانگین را برای جداسازی داده های نرمال و غیر نرمال به این سیستم اعمال کنیم، پس از تخمین توابع توزیع احتمال داده های نرمال و غیر نرمال، مقادیر $q_1 = 0.1204$ و $p_2 = 0.1486$ به دست می آید. هدف طراحی یک سیستم هشدار با شاخص های عملکردی $FAR < 0.05$، $MAR < 0.05$ و $AAD < 5\ sec$ می باشد.

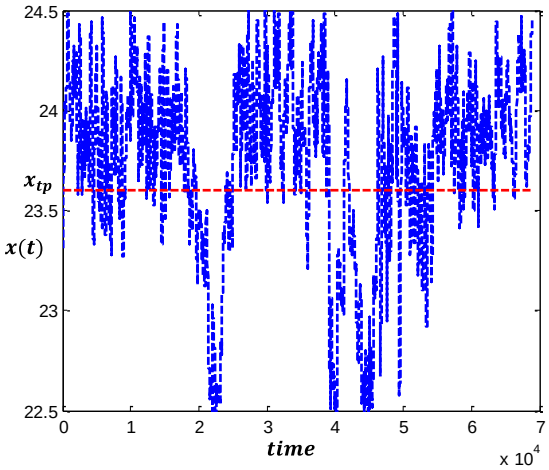
در جدول ۴ شاخص های عملکردی سیستم هشدار مربوط به الگوریتم ریست در مرجع [۱۴] نشان داده شده است. در جدول ۵ نتایج مربوط به الگوریتم پیشنهادی این مقاله برای مقادیر بهینه پارامتر های n، i و x_{tp} نشان داده شده است. از مقایسه نتایج این دو جدول می توان دریافت که سناریوی پنالتی عملکرد بهتری نسبت به سناریوی ریست دارد. به عنوان مثال در مرجع [۱۴] پارامتر های بهینه سیستم هشدار را $n = 4$ و $x_{tp} = 23.6$ پیشنهاد داده است که در نتیجه آن، شاخص های عملکردی به صورت $MAR = 0.0010$ ، $FAR = 0.0025$ و $AAD = 4.5694$ به دست می آید در حالیکه در سناریوی پنالتی پارامترهای بهینه سیستم هشدار $n = 4. i = 2$ و $x_{tp} = 23.596$ پیشنهاد شده است که در نتیجه آن، شاخص های سیستم هشدار $MAR = 0.0022$ ، $FAR = 0.000943$ و $AAD =$ 3.3997 به دست می آید که نتایج مطلوب تری نسبت به سناریوی ریست دارد.

۸- بحث و نتیجه گیری

مبحث طراحی سیستم های هشدار بواسطه نقشی که در ایمنی و عملکرد مناسب سیستم های صنعتی دارند، از اهمیت بالایی برخورداراست. در این مقاله یک روش سیستماتیک برای طراحی یک سیستم هشدار تک متغیره مبتنی بر سناریوی جدیدی تحت عنوان سناریوی پنالتی ارائه شده است. علاوه بر پارامترهای MAR،FAR و AAD، پارامتر جدیدی تحت عنوان MTTA و یا "میانگین زمانی رخداد هشدار" معرفی شده است که با استفاده از آن می توان به راحتی پارامتر AAD را در سناریوی پیشنهادی محاسبه کرد. در این مقاله عملکرد سناریوی ریست به عنوان حالت خاصی از سناریوی پنالتی با الگوریتم

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.4.6.2]

پیشنهادی مقایسه شده و نشان داده شده است که سناریوی پنالتی حالت جامعی از سناریوی ریست است که می تواند در پنالتی های مختلف عملکرد بهتری داشته باشد. برای تنظیم پارامترهای سیستم هشدار و رسیدن به عملکرد بهینه سیستم هشدار از الگوریتم ژنتیک برای انتخاب بهینه پارامترهای i،n و x_{tp} استفاده شده است. در نهایت عملکرد سیستم هشدار با چندین مثال و سیگنال های واقعی مورد بحث قرار گرفته است.



شکل ۱۲: داده مربوط به سنسور فشار

مراجع

[1] ISA, (Instrumentation, Systems & Automation Society). "Management of alarm systems for the process industries." North Carolina: ISA 18.02, 2009.

[2] EEMUA, (Engineering Equipment and Materials Users' Association). "Alarm systems: a guide to design, management and procurement." 3rd ed. London: EEMUA Publication 191, 2013.

[3] Ahnlund, Jonas, Tord Bergquist, and Lambert Spaanenburg. "Rule-based reduction of alarm signals in industrial control." Journal of Intelligent and Fuzzy Systems. Vol. 14, no.2, pp.73-84, 2003.

[4] Brooks, Robin, Richard Thorpe, and John Wilson. "A new method for defining and managing process alarms and for correcting process operation when an alarm occurs". Journal of hazardous materials. Vol.115, no.1, pp.169-174, 2004.

[5] Hugo, A.J., 2009. "Estimation of alarm deadbands". IFAC Proceedings Volumes, Vol.42, no.8, pp.663-667,2009.

[6] Wang, Jiandong, and Tongwen Chen. "An online method to remove chattering and repeating alarms based on alarm durations and intervals". Computers & Chemical Engineering. Vol.67, pp.43-52, 2014.

[7] Liu, Jun, et al. "The intelligent alarm management system." IEEE software. Vol.20, no.2, pp.66-71, 2003.

[8] Srinivasan, R., et al. "Intelligent alarm management in a petroleum refinery: plant safety and environment." Hydrocarbon processing. Vol. 83, no.11, pp.47-53, 2004.

[9] Simeu-Abazi, Zineb, Arnaud Lefebvre, and Jean-Pierre Derain. "A methodology of alarm filtering using dynamic fault tree." Reliability Engineering & System Safety. Vol.96, no.2, pp.257-266,2011.

[10] Adnan, Naseeb Ahmed, and Iman Izadi. "On detection delays of filtering in industrial alarm systems." 21st Mediterranean IEEE Conference on Control & Automation, pp. 113-118, 2013.

[11] Cheng, Yue, Iman Izadi, and Tongwen Chen. "Optimal alarm signal processing: Filter design and performance analysis." IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. Vol.10, no. 2, pp.446-451, 2013.

[12] Naghoosi, Elham, Iman Izadi, and Tongwen Chen. "Estimation of alarm chattering." Journal of Process Control. Vol.21, no. 9, pp.1243-1249, 2011.

[13] Kondaveeti, Sandeep R., Iman Izadi, Sirish L. Shah, David S. Shook, Ramesh Kadali, and Tongwen Chen. "Quantification of alarm chatter based on run length distributions." Chemical Engineering Research and Design. Vol.91, no. 12, pp.2550-2558, 2013.

[14] Xu, Jianwei, Jiandong Wang, Iman Izadi, and Tongwen Chen. "Performance assessment and design for univariate alarm systems based on FAR, MAR, and AAD." IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. Vol.9, no. 2, pp.296-307, 2012.

[15] Adnan, Naseeb Ahmed, Yue Cheng, Iman Izadi, and Tongwen Chen. "Study of generalized delay-timers in alarm configuration." Journal of Process Control. Vol.23, no. 3, pp.382-395, 2013.

[16] Adnan, Naseeb Ahmed, Iman Izadi, and Tongwen Chen. "On expected detection delays for alarm systems with deadbands and delay-timers." Journal of Process Control. Vol.21, no. 9, pp.1318-1331, 2011.

[17] Han, Liu, Huihui Gao, Yuan Xu, and Qunxiong Zhu. "Combining FAP, MAP and correlation analysis for multivariate alarm thresholds optimization in industrial process." Journal of Loss Prevention in the Process Industries. Vol.40, pp.471-478, 2016.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]
[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.4.6.2]

[18] Zhang, Kai, Steven X. Ding, Yuri AW Shardt, Zhiwen Chen, and Kaixiang Peng. "Assessment of T 2-and Q-Statistics for Detecting Additive and Multiplicative Faults in Multivariate Statistical Process Monitoring." Journal of the Franklin Institute. 2016

[19] Xu, Xiaobin, Shibao Li, Xiaojing Song, Chenglin Wen, and Dongling Xu. "The optimal design of industrial alarm systems based on evidence theory." Control Engineering Practice. Vol.46, pp.142-156, 2016.

[20] Wang, Jiandong, Fan Yang, Tongwen Chen, and Sirish L. Shah. "An Overview of Industrial Alarm Systems: Main Causes for Alarm Overloading, Research Status, and Open Problems." IEEE Transactions on Automation Science and Engineering. Vol.13, no. 2, pp.1045-1061, 2016.

[21] Pettitt, A. N. "A non-parametric approach to the change-point problem." Applied statistics. pp.126-135, 1979.

[22] Silverman, Bernard W. "Density estimation for statistics and data analysis". CRC press. Vol. 26, 1986.

[23]Shimazaki, Hideaki, and Shigeru Shinomoto. "Kernel bandwidth optimization in spike rate estimation." Journal of computational neuroscience. Vol.29, no.1-2, pp.171-182, 2010.

[24] Botev, Zdravko I., Joseph F. Grotowski, and Dirk P. Kroese. "Kernel density estimation via diffusion." The Annals of Statistics. Vol.38, no.5, pp.2916-2957, 2010.

[25] Floreano, Dario, and Claudio Mattiussi."Bio-inspired artificial intelligence: theories, methods, and technologies". MIT press, 2008.

[26] Tchangani, Ayeley, and Daniel Noyes. "Modeling dynamic reliability using dynamic Bayesian networks." Journal Européen des systèmes automatisés. Vol.40, no. 8, pp.911-935, 2006.

[Downloaded from joc.kntu.ac.ir on 2026-11-08]

[DOR: 20.1001.1.20088345.1395.10.4.6.2]