



دانشگاه کاشان
University of Kashan

مجله محاسبات نرم

SOFT COMPUTING JOURNAL

تارنمای مجله: sci.kashanu.ac.ir



استخراج قوانین از توصیف و مدل‌سازی آنها با استفاده از شبکه‌های پتری فازی رنگی

مینا چاوشی¹، کارشناسی ارشد، سیدمرتضی بابامیر^{1*}، استاد
¹ گروه مهندسی نرم افزار، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

چکیده

در این مقاله، قوانین حاکم بر رفتار سیستم از توصیف آن استخراج و سپس با شبکه پتری مدل‌سازی می‌شود. مجموعه این قوانین، پایگاه دانش سیستم را تشکیل می‌دهد که قابلیت استنتاج از آن را فراهم می‌آورد. هر قانون از تعدادی شرط و یک نتیجه تشکیل شده است. زمانی که تعداد قوانین زیاد و شرط‌ها در قوانین مختلف همپوشانی داشته باشند، می‌توان با استفاده از ساختار سلسله مراتبی به وسیله موتور استنتاج از تکرار شرط‌ها جلوگیری کرد و در نتیجه تعداد بررسی لازم برای رسیدن به نتیجه را کاهش داد. وقتی این قوانین دارای متغیرهای زیاد و فازی باشند، شکل پیچیده‌ای به خود می‌گیرند و درک و استنتاج رفتار آنها مشکل می‌شود. برای درک بهتر این پیچیدگی، مناسب است که آن را با استفاده از شبکه‌های پتری فازی بصری‌سازی کنیم. تاکنون روش‌های مختلف و متعددی مبتنی بر شبکه‌های پتری فازی برای مدل کردن قوانین فازی ارائه شده است، اما این روش‌ها یا تعداد قوانین و متغیرهای زیاد در سیستم را پشتیبانی نمی‌کنند یا مواردی مانند نقش گزاره‌های شرطی در وقوع گزاره‌های نتیجه، احتمالی بودن گزاره‌های نتیجه، مقدار آستانه برای گزاره‌های شرطی و نتیجه، ضریب قطعیت برای قانون یا برای گزاره‌های نتیجه را در نظر نمی‌گیرند. در این مقاله، با توسعه کار قبلی خود، مدلی مبتنی بر شبکه پتری فازی ارائه می‌دهیم که دو مورد بیان شده در بالا را پوشش می‌دهد و کاستی‌هایی که در توصیف مدل در کار قبلی ما وجود داشت را جبران می‌کند. در انتها، مدل پیشنهادی را برای یک سیستم تصفیه آب ایمن و حملات آن به کار می‌بریم.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۱۲ تیر ماه ۱۴۰۱
پذیرش ۱۳ آبان ماه ۱۴۰۱

کلمات کلیدی:

جدول گذار حالت
شبکه پتری فازی
استنتاج فازی
سیستم‌های مبتنی بر دانش

© ۱۴۰۱ نویسنده‌گان. مقاله با دسترسی آزاد تحت مجوز CC-BY

۱. مقدمه

سیستم‌های بانکی و مالی، تولید و توزیع مواد غذایی، بهداشت و درمان، پالایشگاه‌ها، کارخانجات بزرگ، سدها و ... می‌باشد. به طور معمول، رفتار این سیستم‌ها به صورت غیرقطعی (فازی) است و با استفاده از قوانین فازی توصیف می‌شود. حملاتی که علیه این گونه سیستم‌ها صورت می‌گیرد، می‌تواند فجایع جبران‌ناپذیری را به همراه داشته باشد. در این حملات مهاجم با تغییر ویژگی‌های سیستم، حمله را به قصد خرابکاری و آسیب زدن به سیستم تحت کنترل، صورت می‌دهد. با تشخیص و متوقف کردن حملات شناخته شده، می‌توان از به بار آمدن

آسایش جامعه در زندگی روزمره در گرو عملکرد صحیح سیستم‌هایی مثل شبکه انتقال و توزیع برق، فناوری اطلاعات و ارتباطات، سیستم‌های آبرسانی، سیستم‌های حمل و نقل و کنترل ترافیک، آموزش و پژوهش، سیستم‌های تصفیه و فاضلاب،

* نوع مقاله: پژوهشی

* نویسنده مسئول

پست(های) الکترونیک: mchavoshi@grad.kashanu.ac.ir

babamir@kashanu.ac.ir (بابامیر)

تعداد قوانین و متغیرهای زیاد بسیار پیچیده و غیرقابل پیاده‌سازی خواهند بود. در کار قبلی ما [۱]، مدلی برای استدلال و بصری‌سازی تعداد قوانین بالا به صورت سلسله مراتبی و همچنین مدیریت کردن تعداد ویژگی‌های زیاد با استفاده از نشانه‌های رنگی ارائه شده است اما مواردی که در مطالعات قبلی برای قوانین لحاظ شده‌اند را پشتیبانی نمی‌کند. در این مقاله در نظر داریم که کار قبلی خود را به نحوی توسعه دهیم که بتواند کمبودهای مدل ارائه شده را جبران کند.

در مدل پیشنهادی، ابتدا رفتار سیستم را به صورت جدول گذار حالت مدل می‌کنیم تا قوانین رفتاری سیستم را از آن استخراج کنیم. سپس جدول گذار حالت را به شبکه پتری نگاشت کرده و قوانین رفتاری استخراج شده را نیز جهت انجام فرآیند استدلال داخل تابعی در مدل بکار می‌بریم تا امکان اجرای سیستم در سطح مدل فراهم شود. مدل پیشنهادی توانایی تحلیل سیستم‌هایی که رفتار آنها در محیط‌های غیرقطعی با تعداد قوانین و متغیر زیاد بیان شده را دارا است و می‌تواند با بیان ویژگی‌های سیستم با استفاده از نشانه‌های سطح بالا^۳ و بیان قوانین به صورت تودرتو از پیچیدگی بکاهد. همچنین برای مواجهه با ابهام و عدم قطعیت در محیط، امکان بیان درجه درستی^۴ گزاره‌ها و مواردی مثل ضریب قطعیت^۵، مقدار آستانه^۶ برای گزاره‌ها، با استفاده از انواع متغیرهای سطح بالا و سپس بکارگیری این متغیرها در فرآیند استدلال، در مدل تعبیه شده، تا با بهره‌گیری از محاسبات ریاضی، فرآیند استدلال به صورت هوشمندانه‌تری صورت گیرد.

در ادامه، بخش دوم شامل مروری بر کارهای مرتبط بخش سوم، دربرگیرنده توصیف جدول گذار حالت است. سپس در بخش چهارم، کلیت مدل پیشنهادی مطرح شده و در بخش پنجم این مدل برای بخشی از یک سیستم تصفیه آب ایمن بکار برده شده است. در نهایت، در بخش ششم به جمع‌بندی پژوهش جاری پرداخته شده است.

فاجعه و خرابی بیشتر جلوگیری و با عملکرد به موقع به استمرار ارائه خدمات و افزایش بهره‌وری کمک شایانی کرد. در حقیقت مدل‌سازی رفتار سیستم و روش استنتاج مناسب، نقش مهمی را در خودکارسازی تشخیص حملات شناخته شده علیه سیستم و همچنین حفاظت از کارکنان، تجهیزات و محیط ایفا می‌کند. با مدل‌سازی سیستم مورد مطالعه، قبل از پیاده‌سازی آن در جهان واقعی، می‌توان کارایی این سیستم‌ها را ارزیابی کرد. در حقیقت با مدل‌سازی رفتار سیستم و ایجاد شرایط خاص، می‌توان با بررسی رفتار مدل با توجه به شرایط پیش آمده به اطلاعات سودمندی در رابطه با رفتار سیستم رسید و ایرادها، نقاط ضعف و خطاهای احتمالی را کشف کرد و به این ترتیب سیستمی با قابلیت اطمینان بالا تولید کرد. ارائه یک مدل دقیق و کارآمد برای کاربرانی که بر اساس خروجی مدل تصمیم‌گیری می‌کنند و همچنین کسانی که از این تصمیم‌گیری تاثیر خواهند گرفت، حائز اهمیت می‌باشد. یکی از مسائلی که همواره در مدل‌سازی این سیستم‌ها با آن مواجه هستیم، عدم قطعیت و نحوه لحاظ کردن ابهامات محیط در مدل است. شبکه‌های پتری فازی^۱ با ترکیب تئوری مجموعه‌های فازی و تئوری شبکه پتری روشی مناسب برای نمایش اطلاعات مهم درباره حالت یک سیستم و به کارگیری آن در فرآیند استدلال را فراهم می‌آورد. همچنین به دلیل پشتوانه ریاضیاتی و محاسباتی ابزار مناسبی برای مدل‌سازی قوانین و استنتاج می‌باشد. بنابراین ایجاد یک موتور استنتاج قدرتمند مبتنی بر شبکه پتری فازی برای سیستم‌های مبتنی بر قانون که بتواند قوانین را به نحوی بصری‌سازی کند که پیچیدگی کاهش یابد و همچنین با در نظر گرفتن مواردی برای قانون^۲ در مواجهه با عدم قطعیت در محیط، فرآیند استدلال را به صورت دقیق‌تر و واقع‌بینانه‌تری انجام دهد، به ما انگیزه می‌دهد. در مطالعات مختلف مبتنی بر شبکه‌های پتری فازی، مواردی برای قوانین لحاظ شده، که بیان آنها با بهره از متغیرهای سطح بالا و بکارگیری آنها در فرآیند استدلال باعث شده که نتایج واقع‌بینانه‌تری به دست بیاید، اما این روش‌ها برای سیستم‌هایی با

³ High level tokens

⁴ Degree of truth

⁵ Certainty Factor(CF)

⁶ Threshold

¹ Fuzzy Petri Nets

² Rule

۲. کارهای مرتبط

در مطالعات انجام شده پیرامون شبکه‌های پتری فازی، روش‌های استدلال در مدل‌های ارائه شده به سه شاخه (۱) مبتنی بر درخت دسترسی^۱ که از توانایی گرافیکی استفاده می‌کند، (۲) مبتنی بر عملیات جبری که از توانایی ریاضیاتی و محاسباتی بهره می‌برد و (۳) مبتنی بر شبکه‌های پتری سطح بالا، که از مزایایی مثل یادگیری در شبکه‌های عصبی و ... استفاده می‌کند، طبقه‌بندی می‌شوند.

روش‌هایی که در مراجع [۲] و [۳] ارائه شده‌اند، مشابه یکدیگر هستند. در روش پیشنهادی در مرجع [۲]، قوانین تولید فازی^۲ به شبکه پتری فازی نگاشت و با استفاده از مجموعه دسترسی^۳ و مجموعه دسترسی فوری^۴ و درخت دسترسی، فرآیند استدلال را به صورت خودکار انجام می‌دهند. در روش پیشنهاد شده در مرجع [۳]، یک الگوریتم استدلال رو به عقب که یک الگوریتم تعاملی می‌باشد، ارائه شده است. این الگوریتم می‌تواند گراف and-or را به صورت خودکار تولید کند و پس از پیمایش گراف یا درخت تولید شده تا گره برگ، درجه درستی گزاره‌ها را از کاربر دریافت و سپس به سمت گره ریشه، که گزاره هدف است، حرکت کند و در هر سطح، درجه درستی گزاره‌ها را به صورت خودکار محاسبه کند. مقادیر ضریب قطعیت قانون و درجه درستی گزاره به صورت غیرفازی بیان می‌شوند و به دلیل اینکه متغیر وزن در فرآیند استدلال لحاظ نشده، یک شبکه پتری فازی وزن‌دار بهبود یافته در مرجع [۴] برای مقابله با معایب مدل قبلی ارائه شده است که در آن مقادیر فازی برای متغیرهای ذکر شده در نظر گرفته شده است. در مرجع [۵] به این دلیل که الگوریتم فازی ارائه شده در مرجع [۲] مناسب همه انواع داده‌ها نمی‌باشد، این الگوریتم اصلاح شده و همچنین مفهوم شبکه‌های پتری فازی سلسله مراتبی برای انتزاع داده‌ها معرفی شده است. در مرجع [۶]، یک نوع شبکه‌ی پتری فازی تعمیم یافته^۵ برای

نمایش قوانین و استدلال در سیستم‌های پشتیبانی تصمیم^۶، که در آن سه عملگر به شکل نرم سه‌گانه به عنوان جایگزینی برای عملگرهای جبری حداکثر، حداقل و ضرب، عمل می‌کنند، ارائه شده است. در مرجع [۷] یک الگوریتم تجزیه دو مرحله‌ای برای غلبه به انفجار فضای حالت^۷ در شبکه‌های پتری فازی با مقیاس بزرگ که پیچیدگی بالایی دارند، پیشنهاد شده است. این الگوریتم شامل یک مرحله جستجوی عقب‌گرد و یک مرحله استراتژی رو به جلو می‌باشد که با استفاده از یک تابع شاخص^۸ و یک ماتریس وقوع^۹ پیشنهادی، یک شبکه پتری فازی با مقیاس بزرگ را به زیر شبکه‌های پتری فازی تقسیم می‌کند و سپس استدلال را بر اساس آن انجام می‌دهد. در مرحله رو به عقب، با توجه به مکان‌های خروجی مختلف، مسیرهای استدلالی کامل، به صورت خودکار شناسایی می‌شوند. در [۸]، یک شبکه پتری فازی تطبیقی پویا^{۱۰} و همچنین یک الگوریتم استدلال موازی مبتنی بر جبر پیشنهاد شده است که این الگوریتم می‌تواند فرآیند استدلال را به شکل پویا و خودکار اجرا کند. این مدل می‌تواند با تغییر گزاره‌ها در حین فرآیند استدلال، قوانین فازی را تغییر و به آنها ماهیت پویا بدهد. در [۹]، رویکردی برای کسب دانش و بازنمایی^{۱۱} آن، با استفاده از رویکرد استدلال فازی شهودی و شبکه‌های پتری فازی تطبیقی پویا پیشنهاد شده است. در [۱۰]، یک مدل تشخیص خطا و تحلیل علت با استفاده از رویکرد استدلال شواهد فازی و شبکه‌های پتری فازی تطبیقی پویا ارائه شده است که با استفاده از استراتژی رو به جلو تشخیص خطا و تجزیه و تحلیل رو به عقب علت، فرآیند استدلال را به صورت دو طرفه انجام می‌دهد. در مرجع [۱۱]، یک شبکه‌ی پتری فازی شهودی^{۱۲} با استفاده از مجموعه‌های فازی شهودی^{۱۳} و عملگر میانگین وزنی مرتب شده^{۱۴} و همچنین یک الگوریتم استدلال مبتنی بر ماتریس برای اجرای فرآیند استدلال به شکل خودکار،

⁶ Decision support systems

⁷ State space explosion

⁸ Index function

⁹ Incidence matrix

¹⁰ Dynamic Adaptive Fuzzy Petri Net (DAFPN)

¹¹ Knowledge Acquisition and Representation (KA & R)

¹² Pythagorean Fuzzy Petri Nets (PFPNs)

¹³ Intuitionistic Fuzzy Set (IFS)

¹⁴ Ordered Weighted Averaging Operators (OWA)

¹ Reachability Tree

² Fuzzy production rules

³ Reachability Set

⁴ Immediate Reachability Set

⁵ Generalized Fuzzy Petri Nets (GFPNs)

شبکه پتری فازی سطح بالا جهت مدل کردن قوانین فازی اگر-آنگاه^{۱۲} و اگر-آنگاه-درغیراینصورت^{۱۳} و یک الگوریتم کارآمد مبتنی بر آن، برای استدلال خودکار در مورد اطلاعات مبهم فازی ارائه شده است. در [۱۷]، برای بالابردن قابلیت بازنمایی دانش، وزن گزاره‌های شرطی و وزن گزاره‌های نتیجه، برای قانون پیشنهاد و همچنین یک شبکه پتری فازی تعمیم یافته و یک روش استدلال فازی چندسطحی ارائه شده است. در مرجع [۱۸]، یک شبکه پتری فازی شهودی^{۱۴}، با استفاده از ترکیب مجموعه‌های فازی شهودی^{۱۵} با شبکه‌های پتری و یک فرآیند استدلال مرتبط با آن ارائه شده که در آن برای مکان‌های^{۱۶} وارد شده به یک گذار^{۱۷} با وزن نامتقارن، متغیر وزنی در نظر گرفته شده است. در مرجع [۱۹]، یک روش استدلال همروند رو به جلو برای سیستم‌های مبتنی بر قانون با استفاده از یک شبکه پتری فازی رنگی ارائه شده است، که تفاوت آن با روش‌های سنتی، ترکیب نظریه ماتریس تقسیم‌بندی شده همدیس^{۱۸} با فرآیند استدلال می‌باشد. در [۲۰]، یک شبکه پتری فازی شهودی، با استفاده از ترکیب مجموعه‌های فازی شهودی و نظریه شبکه پتری و یک فرآیند استدلال مبتنی بر آن که از عملیات ماتریسی برای بهره‌گیری از محاسبات موازی استفاده می‌کند، ارائه شده است. در مرجع [۱]، یک کنترلر ضربان‌ساز قلب با استفاده از شبکه پتری رنگی^{۱۹} و شبکه پتری رنگی فازی سلسله مراتبی پیشنهاد شده است که حالت‌های همزمان ایجاد شده توسط مقادیر فازی ورودی را تحت پوشش قرار می‌دهد و مدت زمان یافتن یک قانون مناسب را تا ۹۲٪ بهبود می‌بخشد. همچنین عامل نرم افزار هوشمند، دقت عملکرد زمان اجرای نرم افزار ضربان‌ساز را در موقعیت‌های حیاتی و غیرمنتظره بررسی و در صورت یافتن مقدار غیرقابل قبول، تصمیم نرم‌افزار را هدایت می‌کند. در [۲۱]، دو مدل ترکیبی فازی-ژنتیک و فازی-تکامل

پیشنهاد شده است. در [۱۲]، یک شبکه پتری استدلال زبانی^۱ و همچنین یک الگوریتم استدلال زبانی وزنی مرتب شده^۲ برای بازنمایی و استدلال دانش پیشنهاد شده است که در آن قوانین تولید فازی در سیستم‌های خبره مبتنی بر قانون با استفاده از شبکه پتری استدلال زبانی مدل‌سازی می‌شوند. فرآیند استدلال در این مدل به صورت خودکار انجام شده و هر دو وزن گزاره‌های شرطی و نتیجه برای قوانین، در فرآیند استدلال لحاظ می‌شوند. در مدل ارائه شده درجه درستی گزاره‌ها و ضریب قطعیت به صورت دوتایی زبانی^۳ نمایش داده می‌شوند. در مرجع [۱۳]، با ترکیب مجموعه‌های فازی فیثاغورسی^۴ و شبکه‌های پتری فازی، مدل جدیدی از شبکه‌های پتری فازی به نام شبکه‌های پتری فازی فیثاغورسی^۵ برای بیان قوانین و استدلال ارائه شده است؛ علاوه بر این یک روش خوشه‌بندی بر اساس نظر جمع بزرگی از کارشناسان، جهت تعیین درجه درستی مکان‌های ورودی، ارائه شده است که از اشتباهات کارشناسان حوزه جلوگیری می‌کند و کیفیت استدلال را بهبود می‌بخشد. در مرجع [۱۴]، برای نمایش قوانین، یک نوع جدیدی از شبکه‌های پتری فازی به نام شبکه پتری زبانی دو بُعدی نامطمئن^۶ که ترکیبی از متغیرهای زبانی دو بُعدی نامطمئن^۷ و انتگرال Choquet می‌باشد، ارائه شده است. در مدل ارائه شده، از برخی عملگرهای تجمعی جدید مبتنی بر انتگرال Choquet در فرآیند استدلال با در نظر گرفتن تعاملات بین گزاره‌های شرطی استفاده شده است.

در مرجع [۱۵]، یک شبکه پتری فازی تعمیم یافته^۸ به نام شبکه پتری فازی تطبیقی^۹ و یک الگوریتم یادگیری پس انتشار^{۱۰} اصلاح شده مبتنی بر آن ارائه شده است که توانایی یادگیری، مانند شبکه عصبی^{۱۱} را دارا است. در مرجع [۱۶]، یک مدل

¹² IF-THEN

¹³ IF-THEN-ELSE

¹⁴ Intuitionistic Fuzzy Petri Net (IFPN)

¹⁵ Intuitionistic Fuzzy Set (IFS)

¹⁶ Places

¹⁷ Transition

¹⁸ Conformal partitioned matrix

¹⁹ Colored Petri Net (CPN)

¹ Linguistic Reasoning Petri Nets (LRPN)

² Fuzzy Evidential Reasoning (FER)

³ Linguistic 2-tuples

⁴ Pythagorean fuzzy set (PFS)

⁵ Pythagorean Fuzzy Petri Nets (PFPNs)

⁶ Two-Dimensional Uncertain Linguistic Petri Nets

⁷ Two-Dimensional Uncertain Linguistic Variables

⁸ Generalized Fuzzy Petri Net (GFPN)

⁹ Adaptive Fuzzy Petri Net (AFPNet)

¹⁰ Back Propagation

¹¹ Neural network

۳.۱. جدول گذار حالت

جدول گذار حالت، توصیفی از رفتار سیستم به صورت یک جدول است که در آن هر سطر معرف رخداد و شروطی است که موجب یک تغییر حالات سیستم می‌شود. این جدول با الهام از مرجع [۲۴] ایجاد می‌شود. در واقع، جدول گذار حالت، یک روش رسمی و جدولی گویا برای توصیف برنامه‌های مبتنی بر رخداد است [۲۵]. در این روش، متغیرهای مساله تعیین و به دو دسته تقسیم می‌شوند: (۱) متغیر حالت که معرف حالت سیستم و (۲) متغیر مقداری که معرف رخداد یا شرط برای سیستم است. متغیر حالت دارای مقادیری است که هر مقدار آن یک وضعیت یا حالت از سیستم را نشان می‌دهد و متغیر مقداری دارای مقدار true یا false است. اگر مقدار یک متغیر مقدار در دو حالت متوالی از سیستم (جاری و جدید) تغییر نکند، معرف یک شرط است، در غیر این صورت معرف یک رخداد خواهد بود.

جدول (۱ جدول)، جدول گذار حالت برای سیستمی با n متغیر را نشان می‌دهد، این جدول، $n + 2$ ستون خواهد داشت که در آن چپ‌ترین و راست‌ترین ستون، حالت جدید و حالت جاری را نشان می‌دهند و ستون دوم تا یکی به آخر مانده، با نام متغیر ۱، متغیر ۲، ...، متغیر n نام‌گذاری می‌شوند. در ستون‌های مرتبط با متغیرها، یکی از مقادیر "t"، "f"، "@T"، "@F" و یا "-" قرار می‌گیرد. هنگامی که مقدار یک متغیر مقداری در تغییر حالت از جاری به جدید تغییر نمی‌کند با "f" یا "t" نشان داده می‌شود و معرف این است که مقدار متغیر در هر دو حالت یکسان است (false یا true). چنین وضعیتی یک شرط نامیده می‌شود. هنگامی که مقدار یک متغیر مقداری در گذار از حالت جاری به حالت جدید تغییر می‌کند با "@T" یا "@F" نشان داده می‌شود و معرف این است که مقدار متغیر در گذار از حالت جاری به حالت جدید به ترتیب از مقدار false به true یا بالعکس تغییر کرده است. چنین تغییری یک رخداد تلقی می‌شود. مقدار "-" نیز به معنای don't care است. در این جدول، x و y به ترتیب نشان‌دهنده حالت جدید و حالت جاری سیستم می‌باشند.

تفاضلی با اعمال الگوریتم‌های ژنتیک و تکامل تفاضلی بر روی سیستم خبره فازی برای پیش‌بینی بیماری قلبی، برای تنظیم متغیرهای توابع عضویت و بهینه‌سازی نتایج آن پیشنهاد شده است. این دو مدل به ترتیب صحت عملکرد را از ۸۵/۵۲٪ تا ۹۷/۹۳٪ و ۹۷/۶۷٪ افزایش داده‌اند. سپس به منظور بهره‌گیری از قابلیت‌های هر دو الگوریتم، با ترکیب و اعمال آنها بر روی سیستم خبره فازی، مدل ترکیبی فازی-ژنتیک-تکامل تفاضلی را پیشنهاد کرده‌اند که کارایی مدل‌های پیشنهادی را بهبود بخشیده است. در [۲۲]، روش جدیدی برای بکارگیری در خانه‌های هوشمند، جهت تشخیص حالت غیرعادی بیماران و افراد سالمند تنها، از راه دور و همچنین تشخیص میزان خطر رفتار آنها ارائه شده که در سه فاز و بر اساس منطق فازی انجام می‌شود. برای تعیین میزان خطر هر فعالیت با استفاده از منطق فازی، رفتار هر بیمار با توجه به شرایط وی به شکل قوانین به دست می‌آید تا در تعیین غیرعادی بودن رفتار فرد از آنها استفاده شود. با استفاده از سه ویژگی زمان شروع فعالیت، مدت زمان روشن بودن حسگر و مدت زمان خاموش بودن حسگر، میزان غیرعادی بودن رفتار گزارش می‌شود. نتایج به دست آمده از این روش، دقت ۸۴٪ را ایجاد می‌کند. در مرجع [۲۳]، یک روش فازی-ژنتیک خودکار جهت استخراج دانش از مجموعه داده‌ها در قالب مجموعه قوانین فازی و مدیریت عدم قطعیت پیشنهاد شده است. در این روش چندمرحله‌ای پس از عملیات پیش پردازش و حذف قوانین ناسازگار، تکراری و متناقض از قوانینی که به صورت مستقیم استخراج شده‌اند، از الگوریتم ژنتیک، برای اصلاح قوانین فازی و دستیابی به مجموعه قوانین بهینه بهره گرفته شده است.

۳. مقدمات

در این بخش به تعریف برخی مفاهیم مورد استفاده در این مقاله از جمله جدول گذار حالت، منطق فازی، قوانین و استنتاج فازی، شبکه پتری، شبکه پتری فازی رنگی و ویژگی شبکه پتری سلسله مراتبی پرداخته می‌شود.

۳.۵. شبکه پتری فازی رنگی

با توجه به قابلیت منطق فازی در مدیریت ابهام و عدم قطعیت محیط، منطق فازی را با شبکه‌های پتری ترکیب کردند و شبکه‌های پتری فازی پایه را به وجود آوردند که کارایی بالایی در توصیف سیستم‌های فازی از خود نشان می‌دهد. از طرفی شبکه‌های پتری رنگی با استفاده از مفاهیمی مثل نوع داده‌ای و بهره‌گیری از زبان برنامه‌نویسی، امکان نمایش مدل به صورت سلسله مراتبی با ساختار تودرتو را فراهم می‌آورد که برای توصیف سیستم‌های بزرگ و پیچیده بسیار کارآمد است. با توجه به مزایای این دو نوع شبکه، در مرجع [۱]، نوعی شبکه پتری فازی مسطح معرفی شده است که به صورت هشت تایی $FCPN = (P, T, C, D, I, O, \alpha, \beta)$ تعریف می‌شود و در آن

- $P = \{P_1, P_2, \dots, P_k\}$ مجموعه متناهی مکان‌ها،
- $T = \{T_1, T_2, \dots, T_L\}$ مجموعه متناهی گذارها،
- $P \cup T = \emptyset$
- $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$
- $D = \{D_{P_1}, D_{P_2}, \dots, D_{P_k}\}$
- $I: P \rightarrow T$ نگاشت مکان به گذار،
- $O: T \rightarrow P$ نگاشت گذار به مکان،
- $\alpha: C_{ij} \rightarrow [0..1]$
- $\beta: T \rightarrow [0..1]$

مجموعه C ، مجموعه متناهی از متغیرها می‌باشد که هر متغیر آن $(C_j \in C)$ ، یک مجموعه با k متغیر زبانی (عبارت زبانی) است و به صورت $C_j = \{C_{j1}, C_{j2}, \dots, C_{jk}\}$ مشخص می‌شود. همچنین D_{P_i} مجموعه متناهی از نشانه‌های رنگی در مکان P_i را مشخص می‌کند. شکل نشانه‌ها در سطوح مختلف کمی متفاوت هستند. هر نشانه به صورت یک n تایی شامل n زوج (C_{ij}, α_{ij}) است وقتی که n تعداد متغیرها در مجموعه C است. در ضمن $C_j \in C$ و بیانگر یک عبارت زبانی و α_{ij} درجه درستی برای C_{ij} می‌باشد. در نهایت β ضریب قطعیت قانون و احتمال شلیک شدن گذار را نشان می‌دهد.

جدول (۱): جدول گذار حالت برای n متغیر

| حالت جاری | متغیر ۱ | ... | متغیر n | حالت جدید |
|-----------|---------------|-----|---------------|-----------|
| y | $-/f/@F/V/@T$ | ... | $-/f/@F/V/@T$ | x |

۳.۲. منطق فازی

منطق فازی^۱ در مقابل منطق صفر و یکی قرار دارد. منطق، علمی است که در مورد صحت یا عدم صحت گزاره‌ها^۲ بحث می‌کند. در منطق فازی برخلاف منطق صفر و یکی که همه چیز را سیاه یا سفید می‌بیند، یک نگاه خاکستری به موضوعات دارد. در منطق فازی یک گزاره ممکن است «کاملاً درست» یا «کاملاً نادرست» یا در اکثر مواقع «تا حدی درست و تا حدی نادرست» باشد. به عبارت دیگر ارزش درستی یک گزاره می‌تواند عددی بین صفر و یک باشد.

۳.۳. قوانین و استنتاج فازی

قوانین فازی به شکل اگر-آنگاه بیان می‌شوند که در آنها شرطها و نتیجه می‌توانند به صورت فازی ارائه شوند. اجرای قوانین فازی و نتیجه‌گیری حاصل از اجرا، استنتاج فازی نامیده می‌شود.

۳.۴. شبکه پتری

برای مدل‌سازی بصری عملکرد یک سیستم، می‌توان از شبکه پتری استفاده کرد. شبکه پتری علاوه بر بصری‌سازی رفتار یک سیستم، قابلیت اجرا در سطح مدل را دارد تا بتوان نتیجه‌گیری و استنتاج را انجام داد. شبکه پتری نوعی گراف جهت‌دار، وزن‌دار و دوبخشی است که از دو نوع گره مکان^۳ و انتقال^۴ (گذار)، تشکیل شده است. گره‌ها به وسیله کمان^۵ به یکدیگر وصل می‌شوند. کمان می‌تواند یک مکان را به انتقال یا یک انتقال را به مکان وصل کند. در حالی که هرگز دو گره از یک نوع به هم وصل نمی‌شوند. مکان‌ها در گراف به صورت دایره یا بیضی و انتقال‌ها به صورت مستطیل یا میله‌های عمودی ترسیم می‌شوند.

¹ Fuzzy logic
² Proposition
³ Place
⁴ Transition
⁵ Arc

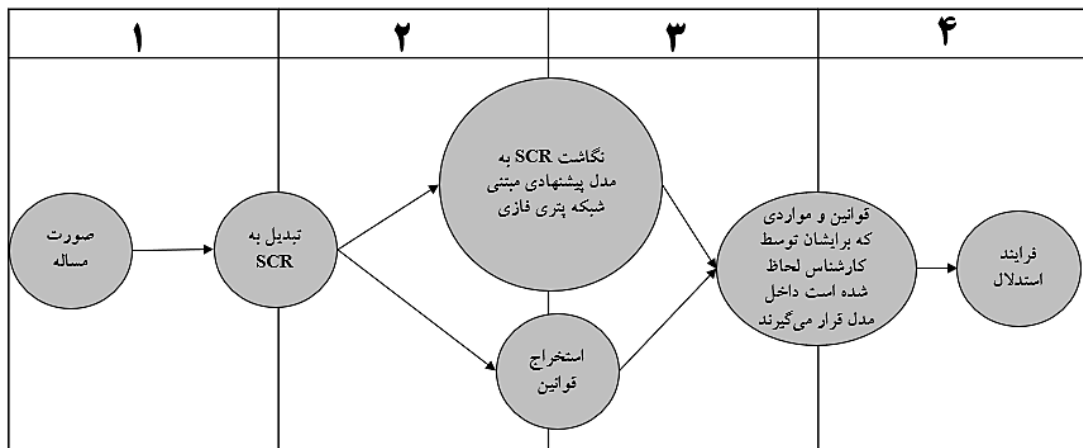
۳.۶. ویژگی شبکه پتری سلسله مراتبی

بر اساس یک اصل کلی در مهندسی نرم افزار، هر چه رفتار یک سیستم با انتزاع بالاتری بیان شود، پیچیدگی بیان کمتر و فهم رفتار آسان تر می شود. بدون انتزاع سطح بالا و بیان تمام جزئیات در مرحله اول، ما با مکان‌ها، گذارها، قوس‌ها و نشانه‌های بسیار زیادی مواجه می شویم که فهم رفتار سیستم را مشکل می سازد اما با روش نمایش سلسله مراتبی نه تنها در سطح اول یک کلیتی ارائه داده می شود که فهم رفتار کلی سیستم نیز ساده می شود. لذا در هر یک از سطح‌های بعدی می توان فقط سطح باز شده (که رفتار مولفه‌ای از سیستم را نشان می دهد)، مورد بررسی قرار داد. به عبارت دیگر، امکان بررسی رفتار مولفه به مولفه سیستم برای ما فراهم می شود و در هر بررسی با یک شبکه پتری محدودی مواجه هستیم. برای مثال وقتی برنامه‌ای با مجموعه‌ای از عناوین توابع (بدون پرداختن به جزئیات رفتاری این توابع) بیان می شود، یک انتزاع سطح بالا و سلسله مراتبی از توابع ایجاد می شود که در آینده با نمایش جزئیات هر تابع، امکان بررسی رفتار هر زیربرنامه به شکل جداگانه وجود خواهد داشت.

۴. رویکرد پیشنهادی

مدل پیشنهادی ما توانایی حل مساله‌هایی را دارد که بتوان رفتار سیستم را با استفاده از جدول گذار حالت در آنها مدل کرد، به نحوی که حالت‌های سیستم به دو بخش نرمال و غیرنرمال تقسیم شده و برای بخش غیرنرمال، حالت‌های متفاوتی در نظر گرفته شود به این صورت که سیستم در حالت نرمال شروع به کار کرده و در صورت وقوع حالت غیرنرمال، متوقف و نوع حالت غیرنرمال اتفاق افتاده و درجه درستی آن را گزارش کند. مراحل نگاشت تدریجی رفتار یک سیستم به مدل پیشنهادی در شکل (۱) نشان داده شده است که در مرحله اول، با توجه به صورت مساله، متغیرهای مقداری و متغیرهای حالت و مقادیر آنها استخراج می شوند.

با فرض وجود n متغیر مقداری و $m + 1$ متغیر حالت شامل یک حالت نرمال و m حالت غیرنرمال، جدولی به صورت جدول (۲) تولید می شود. در این جدول، برای متغیرهای مقداری چندین مقدار در نظر گرفته می شود و در صورتی که این متغیرها رخداد باشند، به شکل «مقدار جدید_مقدار قدیم@» در جدول درج می شوند.



شکل (۱): مراحل نگاشت تدریجی در مدل پیشنهادی

جدول (۲): جدول گذار حالت مدل پیشنهادی

| حالت جاری | متغیر ۱ | ... | متغیر n | حالت جدید |
|-----------|---------------------------|-----|---------------------------|-------------------------|
| نرمال | شرط یا رخداد بودن متغیر ۱ | ... | شرط یا رخداد بودن متغیر n | یکی از m حالت غیر نرمال |

هنگامی که قوانین مختلف در گزاره‌های شرطی با یکدیگر هم‌پوشانی داشته باشند، جدول گذار حالت (برخلاف شبکه‌های پتری سلسله مراتبی)، امکان نمایش این گزاره‌ها به صورت تودرتو را فراهم نمی‌کند. از دیگر مزایای شبکه پتری رنگی این است که می‌توان از نشانه‌های رنگی برای خلاصه‌سازی تعداد متغیرهای بالا بهره گرفت به این صورت که تمام متغیرها و اطلاعات مرتبط با آنها در یک توکن رنگی خلاصه می‌شوند، در نتیجه امکان لحاظ کردن متغیرهایی برای مواجهه با عدم قطعیت در محیط و انجام فرآیند استدلال مبتنی بر این متغیرها فراهم می‌شود. در ضمن شبکه پتری نسبت به جدول گذار حالت، در امکان استنتاج به صورت خودکار، مدل‌سازی و استفاده از روابط فازی پیچیده، قوی‌تر عمل می‌کند. بنابراین در مرحله دوم، این جدول مدل پیشنهادی مبتنی بر شبکه پتری فازی نگاشت (به بخش ۴،۱ مراجعه شود) در نظر گرفته شده است و قوانین معادل با ردیف‌های جدول استخراج می‌شود. در هر ردیف جدول حالت گذار مشخص می‌شود که با تغییر یا عدم تغییر مقدار کدام یک از متغیرها، سیستم به حالت غیرنرمال می‌رود. در قانون معادل با یک ردیف از جدول حالت گذار، وضعیت شرط یا رخداد بودن متغیرها در قسمت شرط و اتفاق افتادن حالت غیرنرمال در قسمت نتیجه، قرار می‌گیرد. در مرحله سوم، مواردی که برای قوانین توسط کارشناس حوزه لحاظ می‌شوند به همراه قوانین استخراج شده داخل تابع res جهت انجام فرآیند استدلال ذخیره می‌شوند. تابع res شامل الگوریتم ریاضیاتی به کار گرفته شده در مدل و همچنین اطلاعاتی است که توسط کارشناس برای حالات سیستم ثبت شده است. این تابع وضعیت فعلی متغیرهای سیستم در گذار از حالت قبلی به حالت جاری، یعنی شرط یا رخداد بودن متغیرها و همچنین درجه درستی آنها را به عنوان متغیرهای ورودی دریافت می‌کند و سپس با استفاده از اطلاعاتی که در این تابع توسط کارشناس ثبت شده و الگوریتم ریاضیاتی به کار گرفته شده در مدل، تعیین می‌کند که کدام حالت غیرنرمال و با چه درجه درستی اتفاق افتاده است. به طور مثال سیستمی شامل سه متغیر a با مقادیر a_1, a_2, a_3 و b با مقادیر b_1, b_2 و c با مقادیر c_1, c_2, c_3 و حالات غیرنرمال

if $a = a_1$ **and** $c = c_2$ **then** $[w_a, w_b, w_c]$,

$[w_{ab_1}, w_{ab_2}, w_{ab_3}]$, $[threshold]$, $[certainty\ factor]$

روند فازی‌سازی برای متغیرهای فازی و احتمال وقوع حالت غیرنرمال، با توجه به متغیر سطح بالای به کار گرفته شده در فرآیند استدلال، به صورت جداگانه انجام می‌شود. در مرحله چهارم، فرآیند استدلال مبتنی بر متغیر سطح بالا با فراخوانی تابع res انجام می‌شود. به هر حال، مدل طراحی شده قابلیت انجام انواع روش‌های استدلال ریاضیاتی بر اساس انواع متغیرهای سطح بالا را دارا می‌باشد.

۴،۱. نگاشت جدول گذار حالت به مدل پیشنهادی

اگر جدول گذار حالت شامل n ستون باشد، سیستم مورد نظر دارای n متغیر می‌باشد. مدل پیشنهادی در ابتدا با توجه به وضعیت سیستم، در دو لحظه متوالی، مشخص می‌کند که آیا متغیر تغییر حالت داده یا ثابت مانده است، سپس با توجه به قانون منطبق بر وضعیت مشخص شده متغیرها، پارامترهای مربوطه استخراج می‌شوند و با توجه به روش استدلال به کار گرفته شده در مدل، فرآیند استدلال انجام می‌شود. جدول (۳)، نگاشت جدول گذار حالت به مدل پیشنهادی را نشان می‌دهد. در ضمن شکل‌های (۲)، (۳) و (۴) نیز نشان‌دهنده مدل کلی از یک سیستم با n متغیر می‌باشند و به ترتیب سطح صفر، سطح یک و سطح n مدل را نشان می‌دهند.

جدول (۳): نگاشت جدول گذار حالت به مدل پیشنهادی مبتنی بر شبکه

| پتری فازی | |
|---|---|
| متغیر j (ستون j) | شبهه پتری فازی در مدل پیشنهادی |
| گذار سطح بالا | $pj1$ و $pj2$ حاوی درجه درستی برای گزاره‌های شرطی هستند. اگر $varj$ رخداد باشد، هر دو متغیر حاوی مقدار خواهند بود، اما اگر $varj$ شرط باشد، متغیر $pj1$ حاوی مقدار و متغیر $pj2$ تهی خواهد بود. |
| n ، مربوط به متغیر j در لحظه t | هر مقدار از مقادیر تعریف دو گذار سطح پایین در سطح مربوط به شده برای متغیر j |
| $Cvarj$ حاوی مقدار فعلی متغیر j | متغیر j |
| $Lvarj$ حاوی مقدار قبلی متغیر j | m حالت غیرنرمال |
| $varj$ حاوی نتیجه بررسی برای متغیر j (شرط یا رخداد) | m مکان |

در سطح صفر، مکان حالت‌های سیستم^۱، نشانه‌های رنگی که وضعیت سیستم در هر لحظه را نشان می‌دهند، در خود نگه می‌دارد. هر نشانه رنگی، مقدار و درجه درستی را برای n متغیر در هر لحظه نشان می‌دهد. مقدار هر یک از n متغیرها، داخل " " و درجه درستی آنها، داخل [] قرار می‌گیرد. با شلیک گذار E ، نشانه رنگی در لحظه t ، به وسیله عبارت روی کمان^۲ که شامل وضعیت فعلی سیستم می‌باشد به مکان حالت جاری^۳ و سپس با شلیک گذار D به مکان حالت قبلی^۴ منتقل می‌شود. در ادامه با شلیک مجدد گذار E ، نشانه رنگی در لحظه $t + 1$ در مکان حالت جاری قرار می‌گیرد. مکان حالت جاری نشانه رنگی مربوط به وضعیت فعلی سیستم و مکان حالت قبلی نشانه رنگی مربوط به وضعیت قبلی سیستم را نگه می‌دارد. با شلیک گذار C ، نشانه‌های رنگی در مکان‌های حالت قبلی و حالت جاری به وسیله عبارت‌های روی کمان‌های ورودی به این گذار، برای مشخص شدن وضعیت هر یک از متغیرها، با استفاده از عبارت

¹ System states
² Arc
³ Current State
⁴ Last State

روی کمان خروجی از این گذار در مکان آماده برای مقایسه^۵ قرار می‌گیرد.

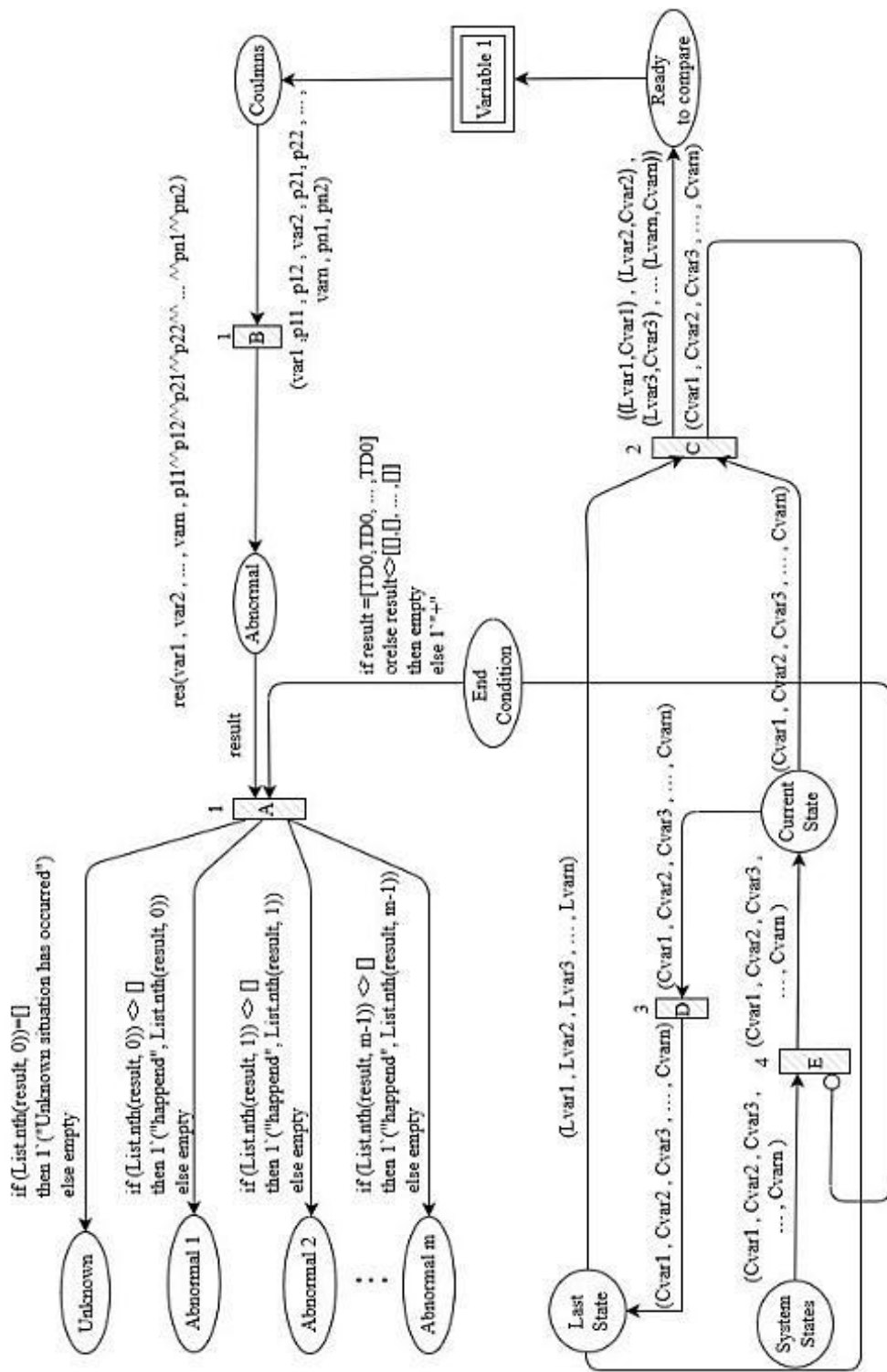
در مدل پیشنهادی به جز سطح صفر، برای هر متغیر، یک سطح برای مشخص شدن ثابت ماندن یا تغییر حالت دادن متغیر، در نظر گرفته می‌شود. بنابراین با توجه به وجود n متغیر، مدل پیشنهادی دارای $n + 1$ سطح خواهد بود. اگر برای یک متغیر، تعداد x مقدار در نظر گرفته شده باشد، سطح مربوط به آن، در صورتی که سطح آخر نباشد، شامل $2x$ گذار سطح پایین و یک گذار سطح بالا (مربوط به متغیر بعدی) می‌باشد (به شکل (۳) مراجعه شود)، اما در صورتی که سطح مورد نظر مربوط به آخرین متغیر و به عبارتی آخرین سطح باشد، تنها شامل $2x$ گذار سطح پایین می‌باشد (شکل (۴) را ببینید). از $2x$ گذار سطح پایین در هر یک از سطوح ۱ تا n ، x گذار آن مربوط به مقدار قبلی متغیر و x گذار دیگر مربوط به مقدار فعلی متغیر می‌باشد. در سطح صفر، درجه درستی صفر، با توجه به روش استدلال و متغیر سطح بالای استفاده شده در مدل جایگزین عبارت TDO می‌شود.

سطح یک مربوط به بررسی وضعیت متغیر اول و سطح n مربوط به بررسی وضعیت متغیر m می‌باشد. روند بررسی در تمامی سطوح مشابه یکدیگر است. در ادامه برای مثال با توجه به شکل (۳)، سطح یک را توضیح خواهیم داد. نشانه رنگی موجود در مکان آماده برای مقایسه به وسیله عبارت

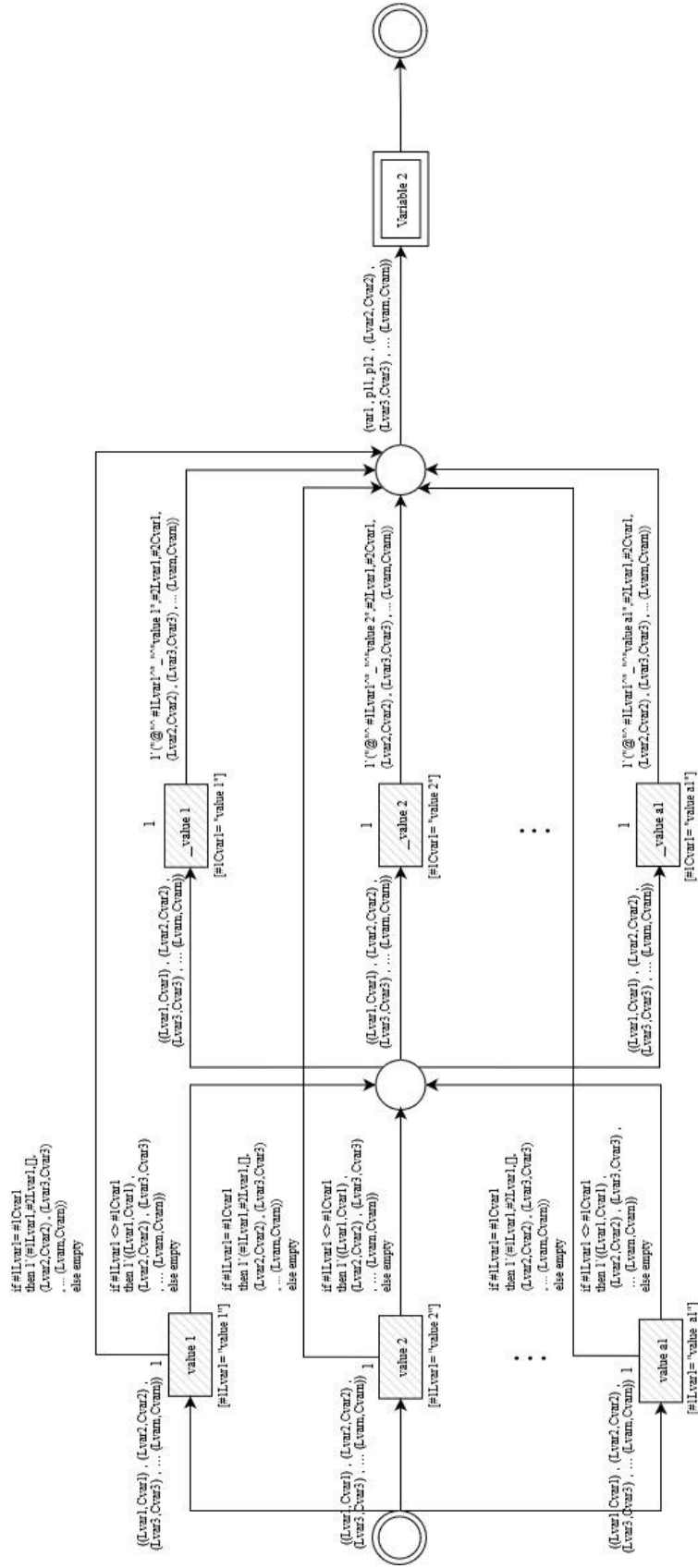
$$((Lvar1, Cvar1), (Lvar2, Cvar2), (Lvar3, Cvar3), \dots, (Lvarn, Cvarn))$$

وارد سطح اول می‌شود. هرکدام از متغیرهای موجود در عبارت شامل مقدار و درجه درستی می‌باشند که #1 به مقدار متغیر و #2 به درجه درستی آنها اشاره دارد. عبارت #1 $Lvar1$ در شروط گذارهای سطح پایین درستون اول به مقدار متغیر در حالت قبلی اشاره دارد. در صورت برابر بودن مقدار متغیر با یکی از مقادیر تعریف شده برای متغیر مورد نظر، گذار سطح پایین مربوط به آن فعال و شلیک می‌شود.

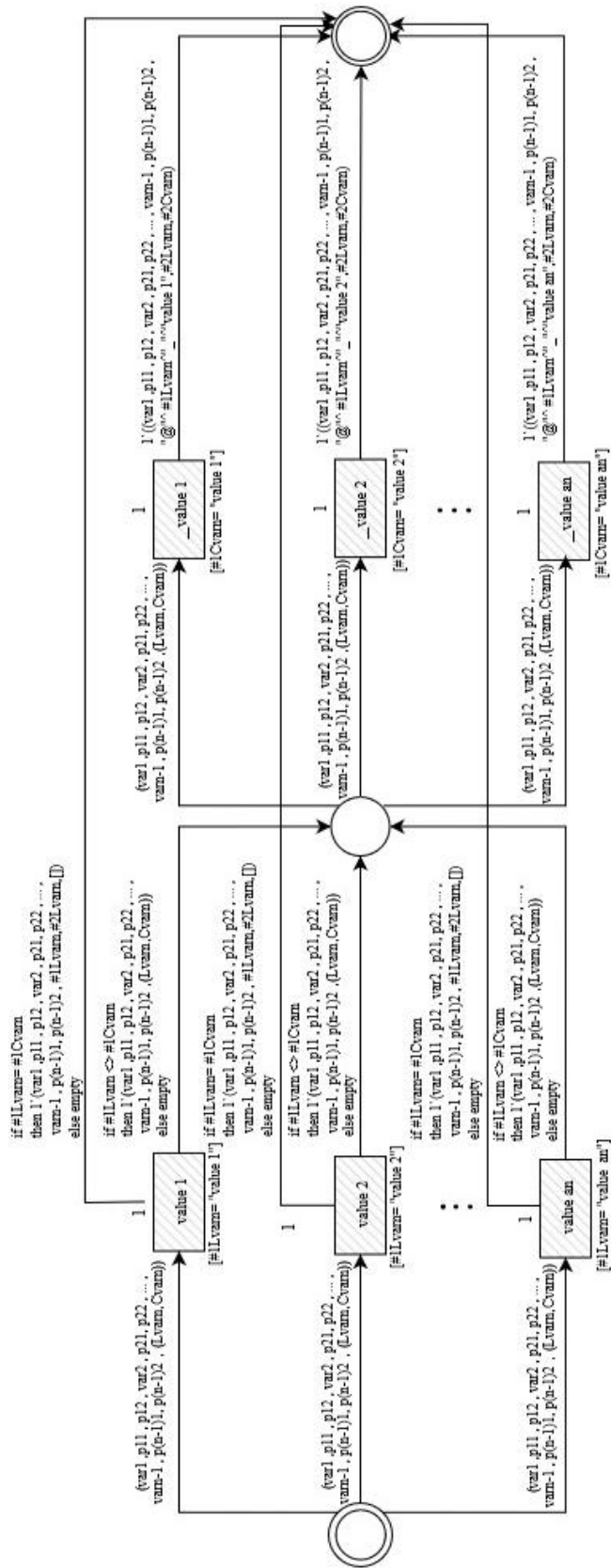
⁵ Ready to Compare



شکل (۲): سطح صفر مدل



شکل (۳): سطح یک مدل



شکل (۴): سطح n مدل

#2Lvar1 به درجه درستی مقدار متغیر در حالت قبلی و عبارت #2Cvar1 به درجه درستی مقدار متغیر در حالت فعلی اشاره دارد.

```
1`("@^ #1Lvar1^"_"^value 1", #2Lvar1, #2Cvar1,
(Lvar2, Cvar2), (Lvar3, Cvar3), ..., (Lvarn, Cvarn))
```

در نهایت در نشانه‌ای که برای بررسی متغیر دوم به سطح بعدی منتقل می‌شود، عبارت $var1$ شامل نتیجه بررسی برای متغیر اول و دو عبارت $p11$ و $p12$ درجه درستی مقدار متغیر می‌باشند که در صورت ثابت بودن مقدار متغیر، عبارت $p12$ تهی و برابر [] خواهد بود.

با شلیک گذار B در سطح صفر، تابع res فراخوانی می‌شود. این تابع جهت انجام فرآیند استدلال، تعبیه شده و $n+1$ متغیر را به عنوان ورودی دریافت می‌کند. مدل طراحی شده قابلیت انجام استدلال‌های مبتنی بر جبر و ریاضیاتی را دارا است. $var1, var2, \dots, varn$ حاوی وضعیت مشخص شده n متغیر و $p11^{p12^{p21^{p22^{...^{pn1^{pn2}}}}$ یک آرایه شامل درجه‌های درستی n متغیر است که به وسیله عملگر $^{}$ ، الحاق شده‌اند. با فراخوانی تابع res ، قانون مربوط به وضعیت فعلی سیستم و متغیرهایی که توسط کارشناس برای آن لحاظ شده، استخراج می‌شود، تا فرآیند استدلال برای یک شبکه پتری مسطح انتزاعی (به شکل (۵) مراجعه کنید) انجام شود. در این شکل، تعداد گزاره‌های خروجی از گذار، ثابت و برابر m خواهند بود اما تعداد گزاره‌های ورودی به گذار، متغیر می‌باشند. در صورتی که مقدار یک متغیر ثابت باشد، برای آن متغیر تنها یک مکان در نظر گرفته خواهد شد (مکان سفید رنگ)؛ اما در صورتی که یک متغیر، تغییر مقدار داشته باشد، حالت بعدی آن متغیر، به عنوان یک گزاره شرطی دیگر، نیز در نظر گرفته خواهد شد. در واقع برای این متغیر علاوه برای مکان سفید رنگ، مکان دیگری که نشان‌دهنده حالت بعدی آن است (مکان رنگی)، در نظر گرفته می‌شود. با توجه به وضعیت سیستم، شکل این شبکه پتری مسطح، به صورت پویا تغییر خواهد کرد.

در ادامه پس از شلیک شدن، دو حالت پیش می‌آید که این دو حالت با شرط گذاری بر روی کمان‌ها بررسی می‌شوند.

حالت اول: متغیر مورد نظر، مقدار ثابتی دارد.

ثابت ماندن مقدار متغیر اول با if زیر بررسی می‌شود که عبارت $[#1Lvar1, #2Lvar1,]$ به عنوان نتیجه این بررسی جایگزین عبارت $(Lvar1, Cvar1)$ شده و به سطح بعد منتقل می‌شود. عبارت $#1Lvar1$ به مقدار قبلی متغیر که در حقیقت مقدار فعلی متغیر نیز می‌باشد و عبارت $#2Lvar1$ به درجه درستی آن اشاره می‌کند. عبارت [] به دلیل اینکه مقدار متغیر تغییر نکرده است، تهی باقی می‌ماند.

```
if #1Lvar1 = #1Cvar1 then
1`(#1Lvar1, #2Lvar1, [, (Lvar2, Cvar2),
(Lvar3, Cvar3), ..., (Lvarn, Cvarn))
else empty
```

حالت دوم: متغیر مورد نظر، تغییر مقدار داده است.

تغییر مقدار متغیر اول با if زیر بررسی می‌شود. در این قسمت مقدار قبلی متغیر مشخص شده و برای بررسی مقدار بعدی متغیر، نشانه وارد شده به سطح یک در خروجی گذارهای سطح پایین ستون اول قرار می‌گیرد.

```
if #1Lvar1 <> #1Cvar1 then
1`((Lvar1, Cvar1), (Lvar2, Cvar2),
(Lvar3, Cvar3), ..., (Lvarn, Cvarn))
else empty
```

عبارت $#1Cvar1$ در شروط گذارهای سطح پایین در ستون دوم، به مقدار متغیر در حالت فعلی، اشاره دارد. در صورت برابر بودن مقدار فعلی متغیر با یکی از مقادیر تعریف شده برای متغیر مورد نظر، گذار سطح پایین مربوط به آن فعال و شلیک می‌شود. پس از شلیک یکی از گذارهای سطح پایین در ستون دوم نوع رخداد متغیر مشخص می‌شود. بنابراین عبارت $"@^ #1Lvar1^"_"^value", #2Lvar1, #2Cvar1$ عنوان نتیجه این بررسی جایگزین عبارت $(Lvar1, Cvar1)$ شده و به سطح بعد منتقل می‌شود. عبارت $#1Lvar1$ حاوی مقدار قبلی متغیر می‌باشد و $value$ مقدار فعلی متغیر است که با توجه به گذار سطح پایین شلیک شده، تعیین می‌شود. عبارت

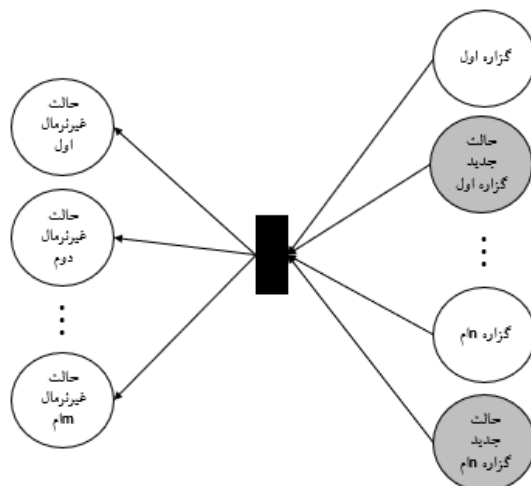
آب طراحی شده، جدول گذار حالت ایجاد می‌شود. در این حملات، مهاجم با تغییر نقاطی از سیستم باعث به وجود آمدن خرابی در سیستم می‌شود. این حملات عبارتند از:

۱. ترکیدن لوله^۲: این حمله در صورتی رخ می‌دهد که پمپ اول روشن و پمپ دوم خاموش باشد و مهاجم پمپ دوم را از حالت off به on تغییر دهد (ردیف ۱ از جدول (۵)).
 ۲. سرریز شدن مخزن^۳: این حمله در صورتی رخ می‌دهد که مقدار سنشگر سطح مخزن، بازه M، بازه H و یا بازه HH را نشان بدهد، شیر موتوری نیز بسته باشد و مهاجم آن را باز کند و در نتیجه باعث سرریز شدن مخزن بشود (ردیف ۲ تا ۴ از جدول (۵)).

۳. کاهش آب مخزن^۴ و آسیب دیدن پمپ^۵: در این حمله زمانی که سنشگر سطح بازه پایین یا متوسطی را نشان می‌دهد، مهاجم با تغییر آن به بازه بالا و خیلی بالا، باعث فریب سیستم و در نتیجه بسته شدن شیر موتوری می‌شود، به این ترتیب آب داخل تانک خالی و منجر به درجا کار کردن پمپ و آسیب دیدن آن می‌شود (ردیف ۵ تا ۱۰ از جدول (۵)).

۴. قطع جریان آب^۶: این حمله در صورتی رخ می‌دهد که پمپ اول روشن و پمپ دوم خاموش یا خراب باشد و یا پمپ اول خراب و پمپ دوم روشن باشد و مهاجم پمپ دوم را از حالت on به off تغییر دهد (ردیف ۱۱ تا ۱۳ از جدول (۵)).

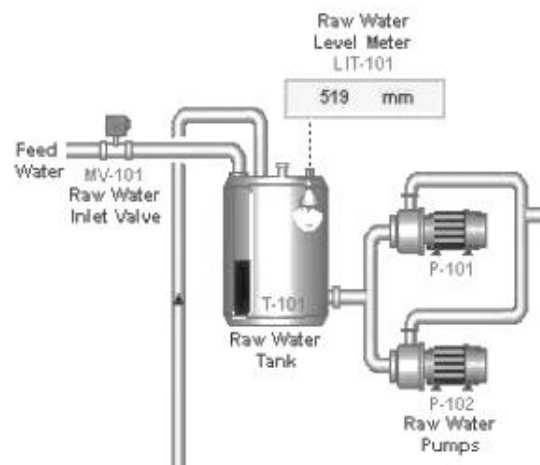
با توجه به حملات تعریف شده، جدول گذار حالت مطابق جدول (۵) ایجاد می‌شود. در مرحله دوم، جدول گذار حالت، به مدل پیشنهادی یعنی شکل‌های (۷) تا (۱۲) نگاشت می‌شود. قوانین معادل با جدول (۵) نیز به صورتی که در جدول (۶) آمده است، تعریف می‌شوند.



شکل (۵): شبکه پتری مسطح به صورت انتزاعی

۵. مورد مطالعه: حملات سیستم تصفیه آب ایمن

به منظور نشان دادن نحوه مدل‌سازی با توجه به مرجع [۲۶]، فرآیند اول از یک سیستم تصفیه آب ایمن^۱ که یک نیروگاه تصفیه آب صنعتی و شامل شش فرآیند است، در نظر گرفته شده است. شکل (۶)، بخشی از این سیستم که مربوط به فرآیند اول از تصفیه آب است، را نشان می‌دهد. این مرحله شامل سه متغیر P101، P102 و MV101 با مقدار قطعی و دو متغیر LIT101 و FIT101 با مقدار فازی می‌باشند. جدول (۴) مقادیر مرتبط با این متغیرها را نشان می‌دهد.



شکل (۶): بخشی از سیستم تصفیه آب ایمن (مربوط به فرآیند اول)

در مرحله اول با توجه به حملاتی که برای فرآیند اول تصفیه

² Pipe bursts

³ Tank overflow

⁴ Tank underflow

⁵ Damage pump

⁶ Stops flow

¹ Secure Water Treatment (SWaT)

جدول (۴): دسته‌بندی مقادیر متغیرهای فرآیند اول سیستم تصفیه آب

| متغیر | توضیح | مقادیر |
|--------|----------------|---|
| P101 | پمپ اول | on (روشن)، off (خاموش)، faild (خراب) |
| P102 | پمپ دوم (یدکی) | on (روشن)، off (خاموش)، faild (خراب) |
| MV101 | شیر موتوری | close (بسته)، semi (نیمه باز یا نیمه بسته)، open (باز) |
| LIT101 | فرستنده سطح | LL (خیلی پایین)، L (پایین)، M (متوسط)، H (بالا)، HH (خیلی بالا) |
| FIT101 | سنجشگر فشار | Min, Normal, Max |

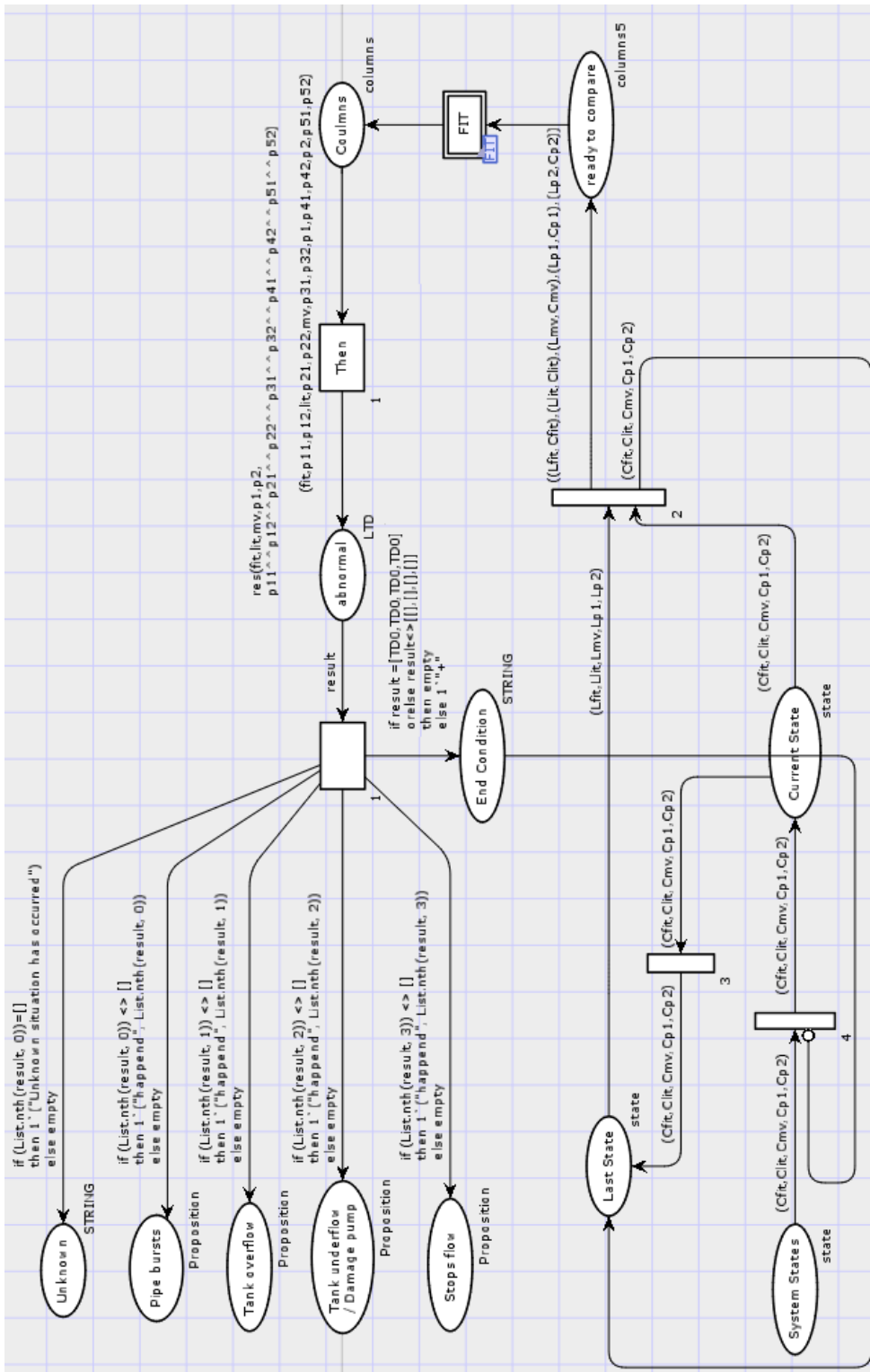
در مرحله سوم، برای قوانین استخراج شده با توجه به نظر کارشناس حوزه و بر اساس متغیر سطح بالای به کارگرفته شده در روش استدلال، مواردی لحاظ می‌شود. قوانین به همراه موارد لحاظ شده در تابعی به صورت لیست ذخیره شده‌اند که با فراخوانی تابع res، قانون مرتبط با وضعیت فعلی سیستم، توسط این تابع مشخص و موارد مرتبط با آن جهت انجام فرآیند استدلال، در متغیری ذخیره خواهند شد. مرحله چهارم شامل اضافه کردن یک روش استدلال برای استنتاج در مدل می‌باشد. در این مرحله فازی‌سازی متغیرها با توجه به روش استدلال به کار گرفته شده، انجام می‌شود.

جدول (۵): جدول گذار حالت برای حملات تعریف شده بر علیه سیستم تصفیه آب ایمن

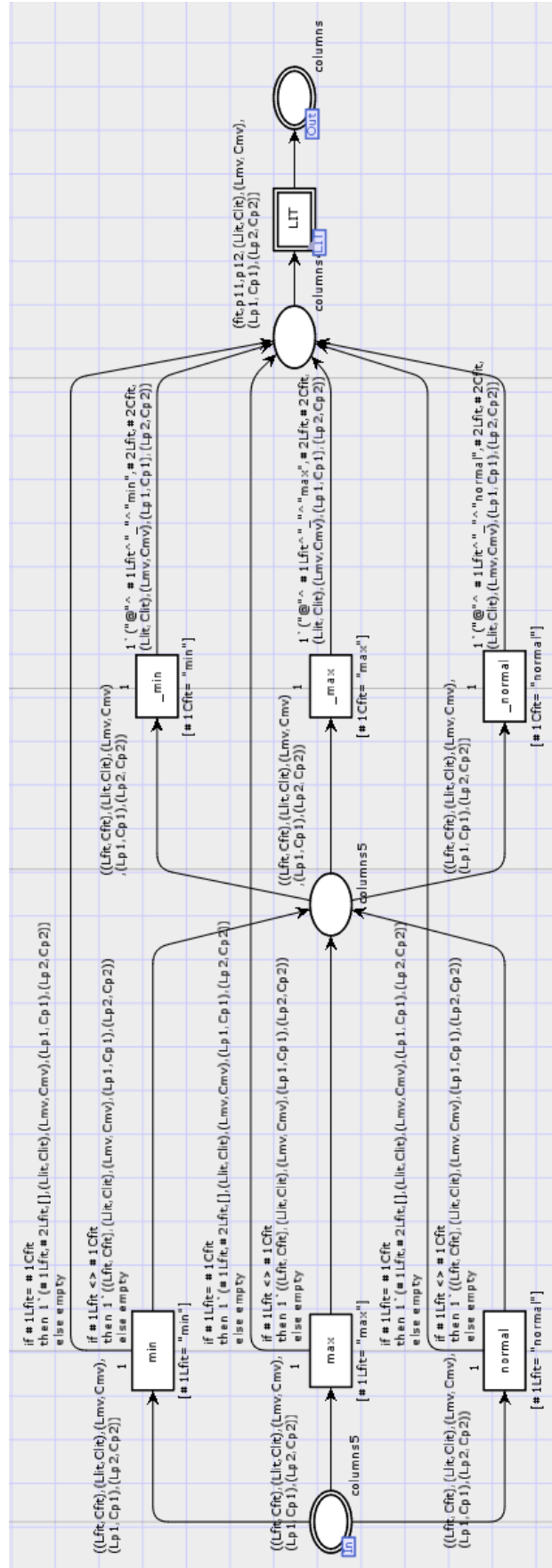
| حالت جاری | FIT101 | LIT101 | MV101 | P101 | P102 | حالت جدید |
|-----------|--------|--------|--------|-------------|---------|----------------------------|
| ۱ | Normal | - | - | on | @off_on | Pipe bursts |
| ۲ | Normal | - | HH | @close_open | - | Tank overflow |
| ۳ | Normal | - | M | @close_open | - | Tank overflow |
| ۴ | Normal | - | HH | @close_open | - | Tank overflow |
| ۵ | Normal | normal | @M_H | open | - | Damage pum /Tank underflow |
| ۶ | Normal | normal | @M_HH | open | - | Damage pum /Tank underflow |
| ۷ | Normal | - | @L_H | open | - | Damage pum /Tank underflow |
| ۸ | Normal | - | @L_HH | open | - | Damage pum /Tank underflow |
| ۹ | Normal | - | @LL_H | open | - | Damage pum /Tank underflow |
| ۱۰ | Normal | - | @LL_HH | open | - | Damage pum /Tank underflow |
| ۱۱ | Normal | - | - | @on_off | off | Stops flow |
| ۱۲ | Normal | - | - | @on_off | faild | Stops flow |
| ۱۳ | Normal | - | - | faild | @on_off | Stops flow |

جدول (۶): قوانین مرتبط با حملات تعریف شده بر علیه سیستم تصفیه آب ایمن

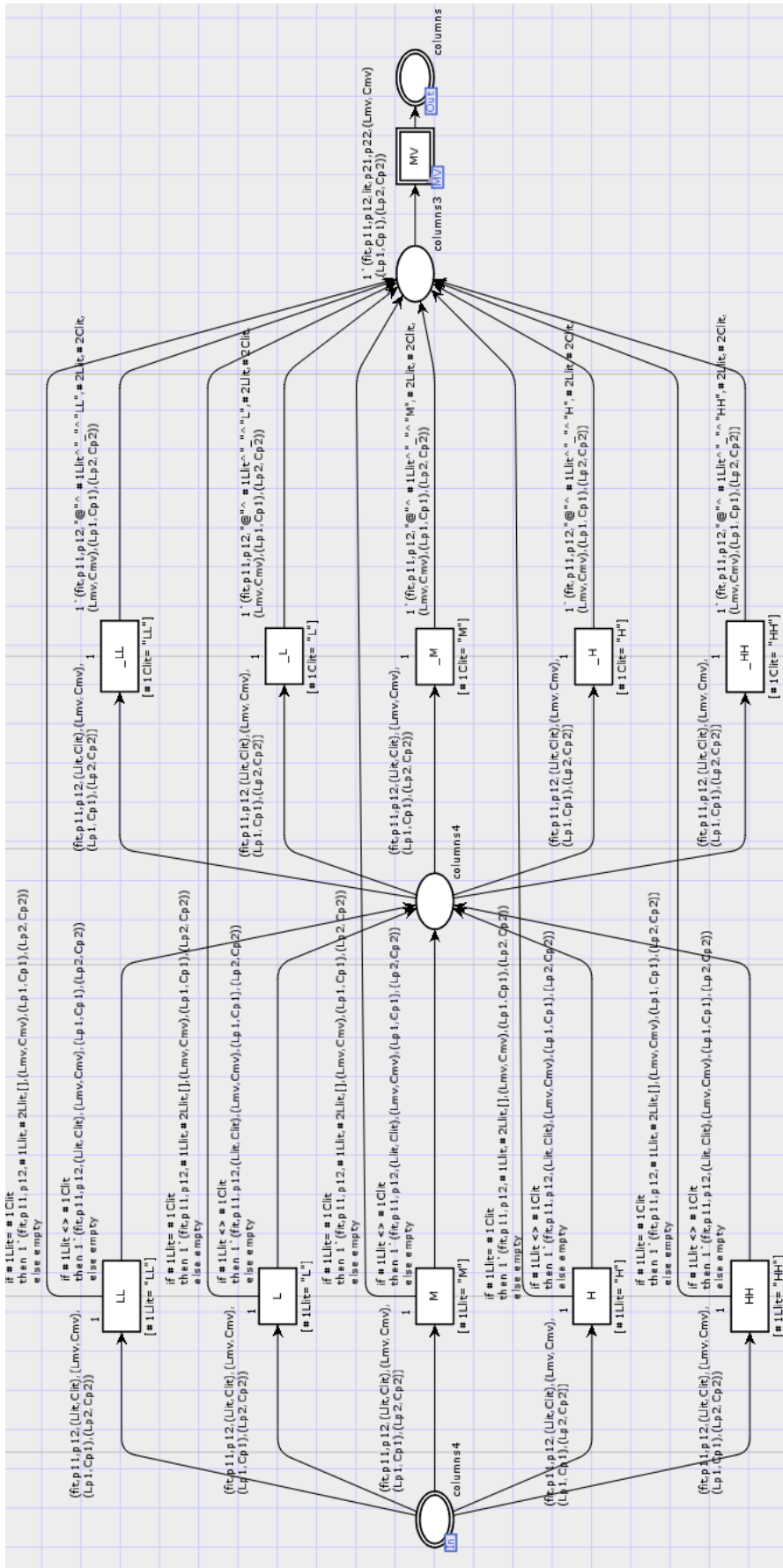
| قانون | ردیف در جدول (۵) |
|---|------------------|
| if (p1="on" andalso p2="@off_on") then Pipe bursts | ۱ |
| if ((lit="M" or else lit="HH" or else lit="H") andalso mv="@close_open") then Tank overflow | ۴ تا ۲ |
| if (fit="normal" andalso (lit="@M_HH" or else lit="@M_H" andalso mv="open")) then Tank underflow /Damage pump | ۶ و ۵ |
| if ((lit="@LL_HH" or else lit="@LL_H" or else lit="@L_HH" or else lit="@L_H") andalso mv="open") then Tank underflow /Damage pump | ۱۰ تا ۷ |
| if (p1="@on_off" andalso (p2="off" or else p2="faild")) or else (p1="fiald" andalso p2="@on_off ") Stops flow | ۱۳ تا ۱۱ |



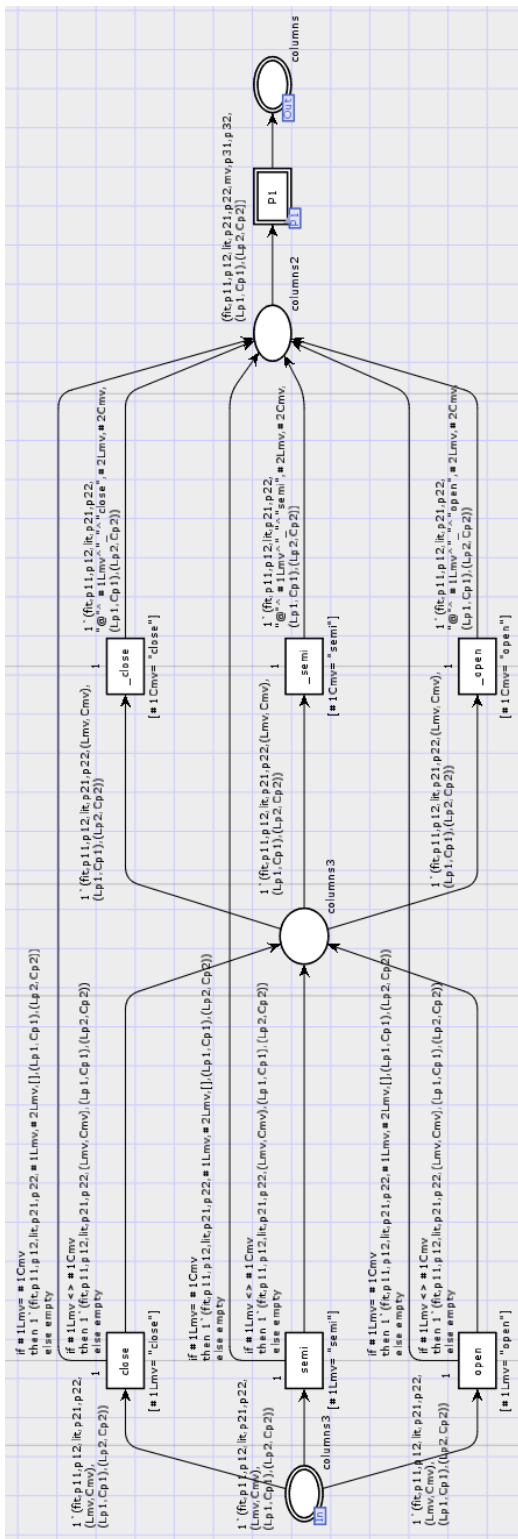
شکل (۷): سطح صفر سیستم تصفیه آب ایمن



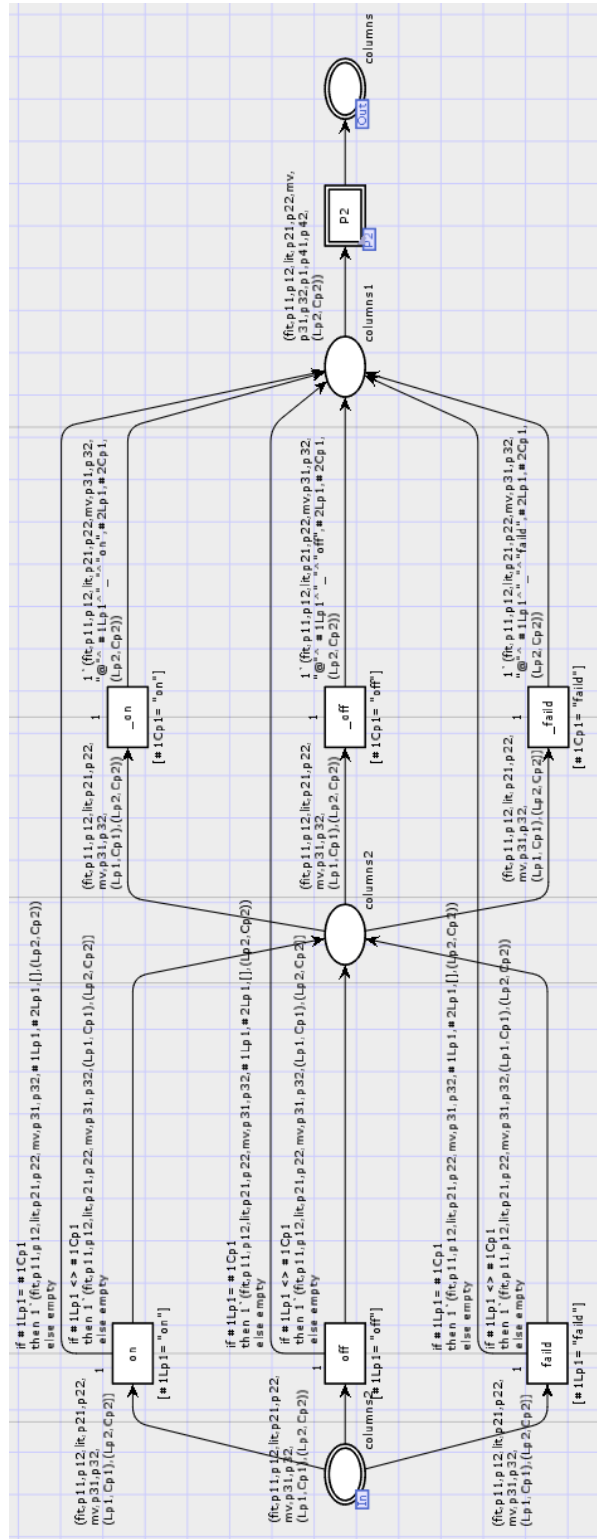
شکل (۸): سطح یک سیستم تصفیه آب ایمن مربوط به متغیر FTT101



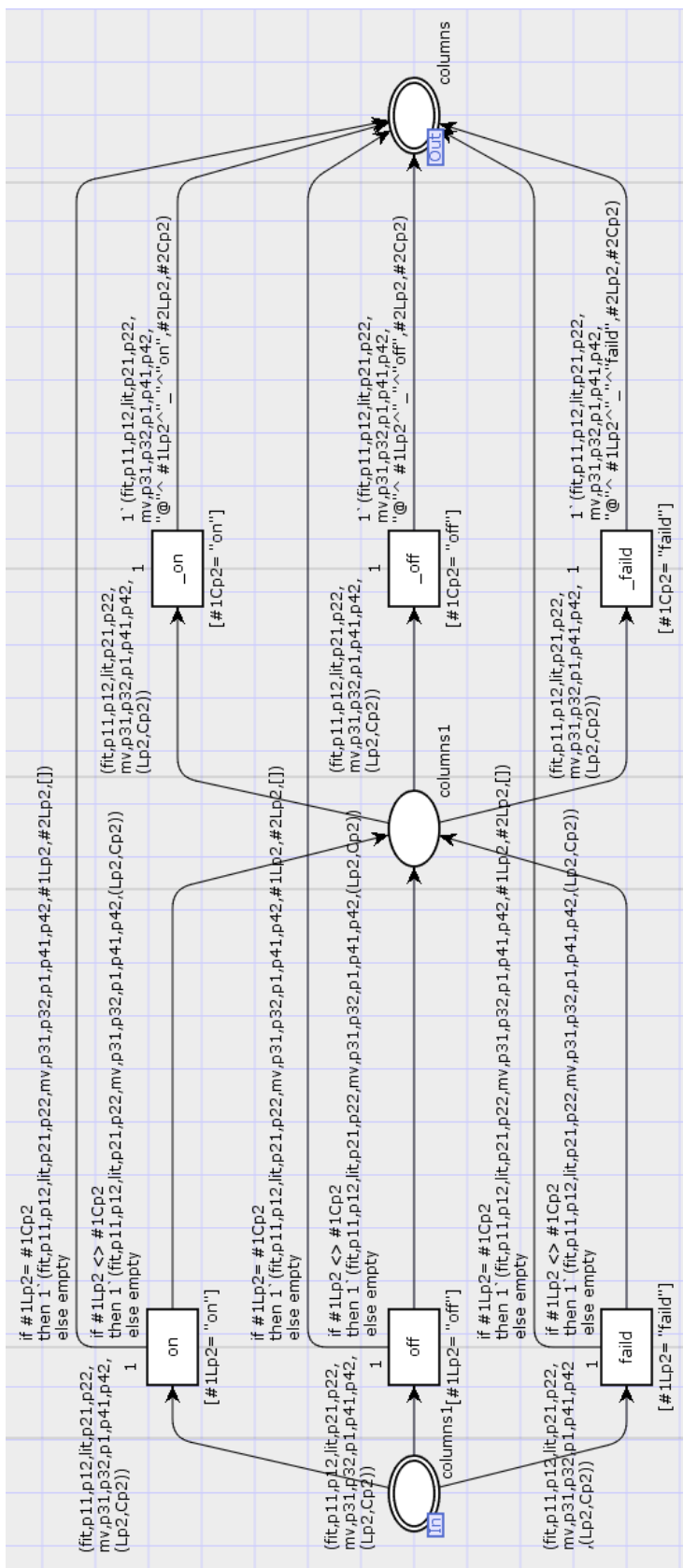
شکل (۹): سطح دو سیستم تصفیه آب ایمن مربوط به مشغول LIT101



شکل (۱۰): سطح سه سیستم تصفیه آب ایمن مربوط به متغیر MV101



شکل (۱۱): سطح چهار سیستم تصفیه آب ایمن مربوط به متغیر P101



شکل (۱۲): سطح پنج سیستم تصفیه آب ایمن مربوط به متغیر P102

برای انجام فرآیند استدلال وارد سطح صفر می‌شود. با توجه به این که فقط متغیر $P2$ رخداد است، این شکل شامل دو مرحله شلیک گذار است. در نهایت شکل (۱۹)، نشانه شامل گزاره‌ها شرطی و احتمالات مرتبط با آنها را جهت انجام فرآیند استدلال نشان می‌دهد. در ضمن فرض کنید برای قانون مرتبط با این وضعیت سیستم، ضریب قطعیت، وزن گزاره‌های شرطی و نتیجه به صورت زیر در تابع res تعریف و از اطلاعات لیست دوبعدی موجود در قسمت نتیجه برای فرآیند استدلال استفاده می‌شود. دقت کنید که بعد اول لیست موجود در قسمت نتیجه، وزن گزاره‌های شرطی، بعد دوم آن وزن گزاره‌های نتیجه و بعد سوم ضریب قطعیت را نشان می‌دهد.

```
if p1 = "on" andalso p2 = "@off_on" then
  [[0,0,0.33,0.33,0.33], [1,0,0,0][0.98]]
```

۶. مقایسه شبکه پتری مدل پیشنهادی با شبکه پتری

فازی سطح

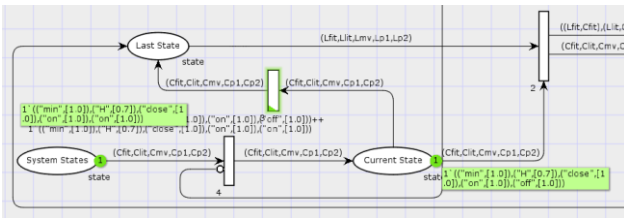
در شبکه‌های پتری سطح، قوانین به گزاره‌ها به مکان نگاشت می‌شوند. در سیستم‌های پیچیده مبتنی بر قانون، قوانین خیلی زیاد بر اساس شرط یا رخداد بودن برخی از متغیرها (گزاره‌ها) منجر به وقوع حالات غیرنرمال می‌شوند. این متغیرها در بسیاری از قوانین با یکدیگر همپوشانی دارند و نقش، تاثیر یا همان وزن آنها در وقوع حالات غیرنرمال با توجه به نظر کارشناس متفاوت است. لذا، پیاده‌سازی این نوع سیستم‌ها با شبکه پتری سطح بر خلاف مدل پیشنهادی به دلیل بزرگ شدن مدل و افزایش سطح پیچیدگی میسر نیست. به علاوه با مشخص کردن متغیرهای قانون به تفکیک، مدل شکل پیچیده‌تری به خود خواهد گرفت. مزیت دیگر مدل پیشنهادی این است که تعداد متغیرهای زیاد در یک قانون را می‌توان در یک توکن رنگی خلاصه نمود و به این وسیله می‌توان به ساده‌سازی قوانین کمک کرد. مدل پیشنهادی توانایی انجام انواع الگوریتم‌های ریاضیاتی را دارا بوده و هر نوع متغیری با توجه به نظر کارشناس می‌تواند برای قانون لحاظ و سپس در فرآیند استدلال به کار گرفته شود. همچنین مدل پیشنهادی مبتنی بر رخداد می‌باشد.

در فرآیند استدلال، ابتدا بررسی می‌شود که وضعیت پیش‌آمده جزء وضعیت‌های نرمال سیستم نباشد، سپس بر اساس این جدول مشخص می‌شود که آیا این حملات رخ داده است یا خیر. با توجه به مجموعه داده مرتبط با این سیستم، وضعیت‌های نرمال استخراج شده، ۸۳ وضعیت بود که آنها را به ۳۶ حالت (۳۶ قانون) کاهش داده‌ایم. دقت کنید که اگر وضعیت پیش‌آمده نرمال نباشد و یکی از حملات تعریف شده هم نباشد، به عنوان وضعیت ناشناخته تشخیص داده می‌شود.

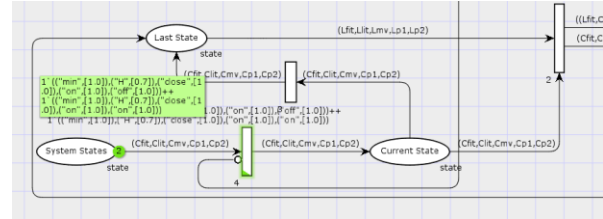
۵.۱. حرکت مرحله به مرحله نشانه برای سناریو مرتبط با حمله ترکیدن لوله

فرض کنید در سیستم تصفیه آب، پمپ اول روشن، پمپ یدکی خاموش و شیر موتوری بسته باشد، همچنین فرستنده سطح عدد ۷۰۱/۷۲۱۶ و سنجشگر فشار عدد صفر را نشان بدهد. با توجه به این که سه متغیر $P1$ ، $P2$ و MV به صورت قطعی این مقادیر را نشان می‌دهند، احتمال آنها ۱ خواهد بود. فرض کنید بر اساس توابع عضویت برای دو متغیر LIT و FIT ، این دو متغیر به ترتیب با احتمال ۰/۷ و ۰، این مقادیر را دارا می‌باشند. در این سناریو مهاجم با تغییر مقدار پمپ یدکی از خاموش به روشن، حمله را انجام می‌دهد. شکل (۱۳)، نشانه‌های مرتبط با این سناریو و مرحله به مرحله حرکت آنها در مدل تا قبل از ورود به سطوح مرتبط با تشخیص شرط یا رخداد بودن متغیرها را نشان می‌دهد.

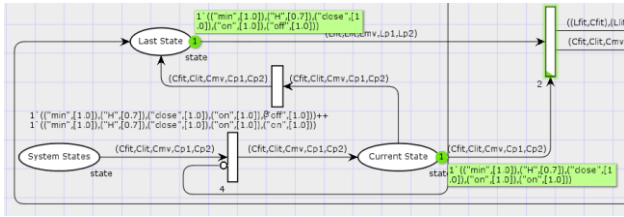
پس از ورود به سطح FIT ، شکل (۱۴) نشانه خروجی از این سطح را نشان می‌دهد، این نشانه برای مقایسه وارد سطح LIT می‌شود. پس از ورود به سطح LIT ، شکل (۱۵) نشانه خروجی از این سطح را نشان می‌دهد، این نشانه برای مقایسه وارد سطح MV می‌شود. پس از ورود به سطح MV ، شکل (۱۶) نشانه خروجی از این سطح را نشان می‌دهد، این نشانه برای مقایسه وارد سطح $P1$ می‌شود. پس از ورود به سطح $P1$ ، شکل (۱۷) نشانه خروجی از این سطح را نشان می‌دهد، این نشانه برای مقایسه وارد سطح $P2$ می‌شود. پس از ورود به سطح $P2$ ، شکل (۱۸) نشانه خروجی از این سطح را نشان می‌دهد، این نشانه



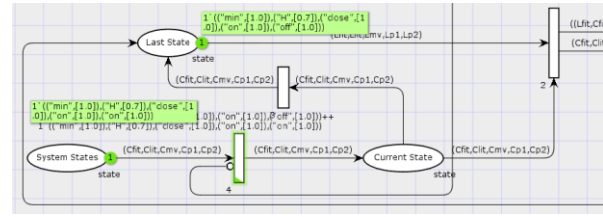
(ب) مرحله دوم قبل از شروع فرایند مقایسه حالت جاری و حالت قبلی



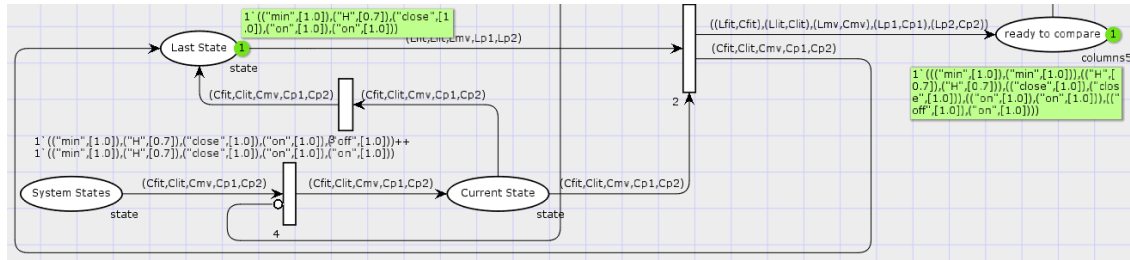
(الف) مرحله اول قبل از شروع فرایند مقایسه حالت جاری و حالت قبلی



(ت) مرحله چهارم قبل از شروع فرایند مقایسه حالت جاری و حالت قبلی

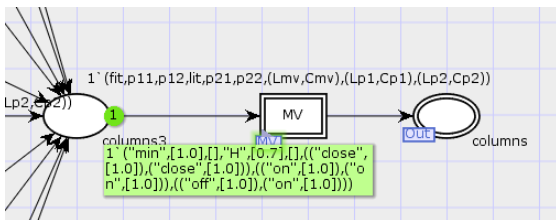


(پ) مرحله سوم قبل از شروع فرایند مقایسه حالت جاری و حالت قبلی

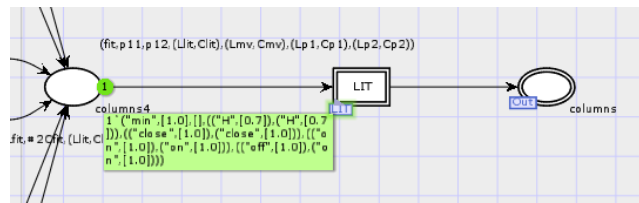


(د) مرحله پنجم قبل از شروع فرایند مقایسه حالت جاری و حالت قبلی

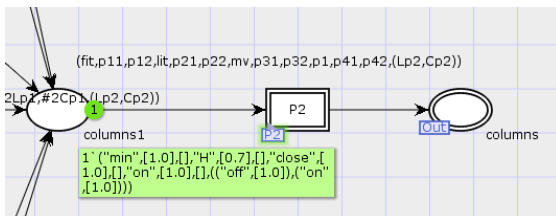
شکل (۱۳): شکل حرکت مرحله به مرحله نشانه تا قبل از شروع فرایند تشخیص شرط یا رخداد بودن متغیرها



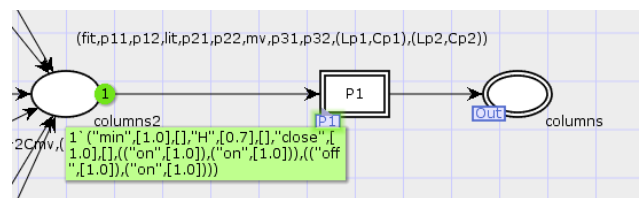
شکل (۱۵): نشانه خروجی از سطح متغیر LIT و آماده ورود به سطح MV



شکل (۱۴): نشانه خروجی از سطح متغیر FIT و آماده ورود به سطح LIT



شکل (۱۷): نشانه خروجی از سطح متغیر MV و آماده ورود به سطح P2



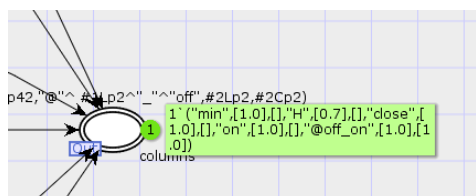
شکل (۱۶): نشانه خروجی از سطح متغیر MV و آماده ورود به سطح P1

جدول (۷): مقایسه شبکه پتری فازی مسطح و شبکه پتری مدل پیشنهادی از نظر اندازه مدل

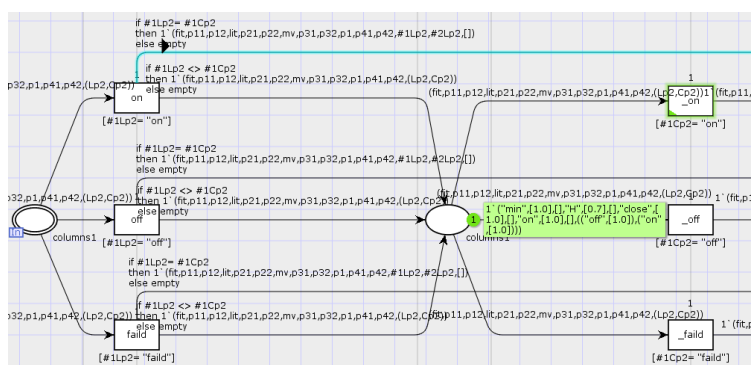
| مدل | گذار | مکان |
|------------------------|-----------|--------------|
| شبکه پتری فازی مسطح | ۱۰۰۰ | ۴۰ |
| شبکه پتری مدل پیشنهادی | ۵+۳۴+۵=۴۴ | ۱+۵+۵+۶+۴=۲۲ |

پیچیدگی محاسباتی روش پیشنهادی بستگی به تعداد شلیک گذارها دارد. بدترین حالت برای شبکه پتری فازی مسطح دارای $O(n)$ است، یعنی زمانی که تمام قوانین بررسی شوند و در مدل پیشنهادی $O(m)$ است، یعنی زمانی که تمامی متغیرها رخداد باشند. با توجه به جدول (۷)، $n=1000$ و $m=44$ ، بترتیب مربوط به شبکه پتری فازی مسطح و شبکه پتری مدل پیشنهادی می‌باشند. از آنجا که $n \gg m$ است، شبکه پتری مدل پیشنهادی نسبت به شبکه پتری فازی مسطح بهبود قابل توجهی دارد.

فرض کنید برای سیستم تصفیه آب ایمن ۱۰۰۰ قانون، توسط کارشناس مشخص شده است. در مدل مسطح شبکه پتری هر قانون به وسیله یک گذار بررسی می‌شود. اگر یک متغیر دارای x مقدار باشد برای آن $2x$ گذار و به تعداد حالات غیرنرمال مکان در نظر گرفته می‌شود. در مدل پیشنهادی، در سطوح مربوط به هر متغیر به تعداد دو برابر مقادیر آن متغیر گذار سطح پایین و به تعداد متغیرها گذار سطح بالا و نیز ۵ گذار در سطح صفر در نظر گرفته می‌شود. به تعداد متغیرها مکان ورودی و مکان میانی، یک مکان خروجی، به تعداد حالات غیرنرمال مکان ۶ و مکان در سطح صفر در نظر گرفته می‌شود. همانطور که در جدول (۷) نشان شده است، مدل پیشنهادی از نظر اندازه مدل نسبت به شبکه پتری فازی مسطح برتری دارد.

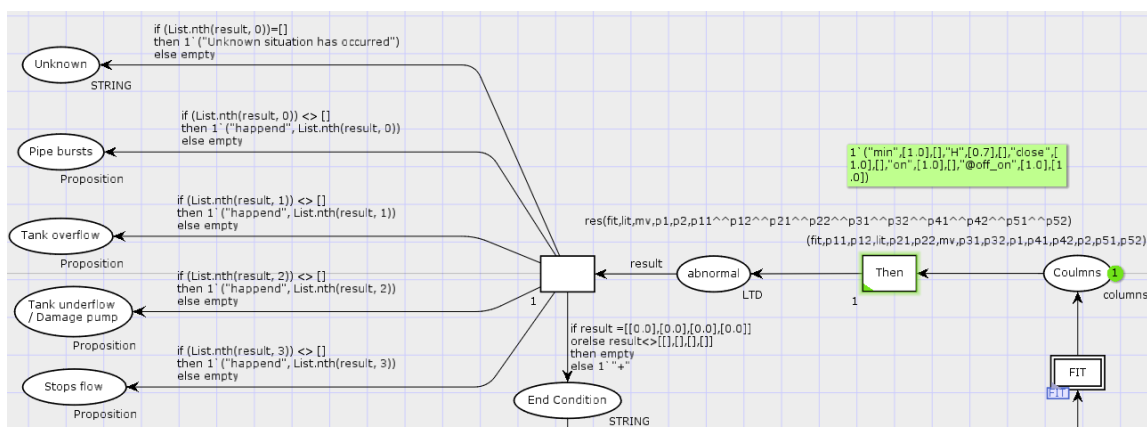


(ب) مرحله اول بعد از ورود نشانه به سطح متغیر P2



(الف) مرحله اول بعد از ورود نشانه به سطح متغیر P2

شکل (۱۸): نشانه خروجی از سطح متغیر P2 و آماده ورودی به سطح صفر



شکل (۱۹): سیستم آماده برای انجام فرایند استدلال

۷. نتیجه‌گیری و کارهای آتی

سیستم به صورت سلسله مراتبی و تودرتو به اما اجازه می‌دهد تا با بررسی هر متغیر در هر سطح از مدل، وضعیت آن را در دو لحظه فعلی و قبلی بررسی کرده و سپس بر اساس وضعیت سیستم (وضعیت متغیرهای سیستم) در دو لحظه متوالی، قانون مرتبط با آن و پارامترهای مربوط به فرآیند استدلال را استخراج کنیم. این مدل‌سازی به دلیل مبتنی بر رخداد بودن و توصیف رفتار سیستم با استفاده از جدول گذار حالت و سپس نگاهش آن به مدل پیشنهادی برای سیستم‌هایی که وضعیت آنها دائم در حال تغییر است و مهاجم می‌تواند با ترتیب دادن انواع حملات سایبری فیزیکی، نقطه یا نقاطی از سیستم را مورد حمله قرار دهد، کارآمد است. در انتهای مقاله جاری، یک سیستم تصفیه آب ایمن به عنوان یک مثال عملی، جهت مدل‌سازی به کار گرفته شد. برای پژوهش‌های آتی در نظر داریم با اضافه کردن روش‌های استدلال مبتنی بر متغیرهای سطح بالا به مدل، ابهام در محیط را به شکل دقیق‌تری در فرآیند استدلال لحاظ کرده و در نتیجه علاوه بر مدل‌سازی، استدلال را نیز دخیل کنیم.

تعارض منافع: نویسندگان اعلام می‌کنند که هیچ تعارض منافعی ندارند.

در این مقاله، یک مدلی مبتنی بر شبکه پتری فازی سلسله مراتبی برای غلبه به شبکه‌های پتری فازی که تاکنون ارائه شده، معرفی شد. شبکه‌های پتری فازی موجود، مسطح و برای نمایش تعداد قوانین کم مناسب هستند اما مدل پیشنهادی این مقاله توانایی بصری‌سازی سیستم‌هایی با تعداد قوانین و متغیرهای زیاد، که پیچیدگی بالایی دارند، را دارا می‌باشد، علاوه بر این، روش پیشنهادی با در نظر گرفتن و بیان مواردی مانند وزن گزاره‌های نتیجه، وزن گزاره‌های شرطی، مقدار آستانه برای گزاره‌های شرطی و نتیجه، ضریب قطعیت برای قانون و یا ضریب قطعیت برای گزاره‌های نتیجه در یک قانون و درجه درستی با استفاده از متغیرهای سطح بالا، سبب بهتر به تصویر کشیده شدن ابهام در محیط و در نتیجه انجام فرآیند استدلال به شکل دقیق‌تری، شده است. در این مدل‌سازی، کارشناس حوزه می‌تواند انواع متغیرها را به هر شکل دلخواه برای قانون مشخص کند. مدل به صورتی طراحی شده که امکان بیان درجه درستی گزاره‌ها و سایر پارامترها با انواع متغیرهای سطح بالا را دارا می‌باشد. همچنین انجام انواع فرآیندهای استدلال مبتنی بر متغیر سطح بالای به کارگرفته شده در مدل، به صورت ریاضیاتی امکان‌پذیر است. در سیستم‌هایی با تعداد ویژگی‌های بالا که رفتار آنها بر اساس قوانین زیاد توصیف می‌شود و گزاره‌های شرطی در این قوانین هم‌پوشانی دارند، مدل‌سازی

مراجع

- [1] N. Majma and S.M. Babamir, "Model-Based Monitoring and Adaptation of Pacemaker Behavior Using Hierarchical Fuzzy Colored Petri-Nets," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst.*, vol. 50, no. 9, pp. 3344-3357, 2018, doi: 10.1109/TSMC.2018.2861718.
- [2] S.M. Chen, J.S. Ke, and J.F. Chang, "Knowledge representation using fuzzy Petri nets," *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, vol. 2, no. 3, pp. 311-319, 1990, doi: 10.1109/69.60794.
- [3] S.M. Chen, "Fuzzy backward reasoning using fuzzy Petri nets," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Part B*, vol. 30, no. 6, pp. 846-856, 2000, doi: 10.1109/3477.891146.
- [4] S.M. Chen, "Weighted fuzzy reasoning using weighted fuzzy Petri nets," *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, vol. 14, no. 2, pp. 386-397, 2002, doi: 10.1109/69.991723.
- [5] J. Leena, R. B. Soney, and T. V. Manoj, "Knowledge representation using fuzzy Petri nets-revisited," *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, vol. 10, no. 4, pp. 666-667, 1998, doi: 10.1109/69.706063.

- [6] Z. Suraj, "A new class of fuzzy Petri nets for knowledge representation and reasoning," *Fundam. Informaticae*, vol. 128, no. 1-2, pp. 193-207, 2013, doi: 10.3233/FI-2013-941.
- [7] K.Q. Zhou, A. Mohd Zain, and L.P. Mo, "A decomposition algorithm of fuzzy Petri net using an index function and incidence matrix," *Expert Syst. Appl.*, vol. 42, no. 8, pp. 3980-3990, 2015, doi: 10.1016/j.eswa.2014.12.048.
- [8] H.C. Liu, Q.L. Lin, L.X. Mao, and Z.Y. Zhang, "Dynamic adaptive fuzzy Petri nets for knowledge representation and reasoning," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst.*, vol. 43, no. 6, pp. 1399-1410, 2013, doi: 10.1109/TSMC.2013.2256125.
- [9] H.C. Liu, L. Liu, Q.L. Lin, and N. Liu, "Knowledge Acquisition and Representation Using Fuzzy Evidential Reasoning and Dynamic Adaptive Fuzzy Petri Nets," *IEEE Trans. Cybern.*, vol. 43, no. 3, pp. 1059-1072, 2013, doi: 10.1109/TSMCB.2012.2223671.
- [10] H.C. Liu, Q.L. Lin, M.L. Ren, "Fault diagnosis and cause analysis using fuzzy evidential reasoning approach and dynamic adaptive fuzzy Petri nets," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 66, no. 4, pp. 899-908, 2013, doi: 10.1016/j.cie.2013.09.004.
- [11] H.C. Liu, J.X. You, X.Y. You, and Q. Su, "Fuzzy Petri nets using intuitionistic fuzzy sets and ordered weighted averaging operators," *IEEE Trans. Cybern.*, vol. 46, no. 8, pp. 1839-1850, 2016, doi: 10.1109/TCYB.2015.2455343.
- [12] H.C. Liu, J.X. You, X.Y. You, and Q. Su, "Linguistic reasoning Petri nets for knowledge representation and reasoning," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst.*, vol. 46, no. 4, pp. 499-511, 2016, doi: 10.1109/TSMC.2015.2445732.
- [13] H.C. Liu, D.H. Xu, C.Y. Duan, and Y. Xiong, "Pythagorean Fuzzy Petri Nets for Knowledge Representation and Reasoning in Large Group Context," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Syst.*, pp. 1-11, 2021, doi: 10.1109/TSMC.2019.2949342.
- [14] H.C. Liu, X. Yun, X. Luan, and M. Zhou, "A New Linguistic Petri Net for Complex Knowledge Representation and Reasoning," *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, pp. 1-11, 2022, doi: 10.1109/TKDE.2020.2997175.
- [15] X. Li, W. Yu, and F.L. Rosano, "Dynamic knowledge inference and learning under adaptive fuzzy Petri net framework," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Part C*, vol. 30, no. 4, pp. 442-450, 2000, doi: 10.1109/5326.897071.
- [16] V.R.L. Shen, "Knowledge representation using high-level fuzzy Petri nets," *IEEE Trans. Syst. Man Cybern., Part A*, vol. 36, no. 6, pp. 1220-1227, 2006, doi: 10.1109/TSMCA.2006.878968.
- [17] M.H. Ha, Y. Li, and X.F. Wang, "Fuzzy knowledge representation and reasoning using a generalized fuzzy petri net and a similarity measure," *Soft Comput.*, vol. 11, no. 4, pp. 323-327, 2007, doi: 10.1007/s00500-006-0084-4.
- [18] X.Y. Shen, Y.J. Lei, and C.H. Li, "Intuitionistic fuzzy petri nets model and reasoning algorithm," in *6th Int. Conf. Fuzzy Syst. Knowl. Discov.*, Tianjin, China, 2009, doi: 10.1109/FSKD.2009.105.
- [19] J. Yuan, C. Liu, B. Jiang, Y. Shan, and W. Shang, "A forward concurrent reasoning approach for rule-based systems using fuzzy colored Petri nets," in *8th World Congress Intell. Control Autom.*, Jinan, China, 2010, doi: 10.1109/WCICA.2010.5554461.
- [20] F.X. Meng, Y.J. Lei, B. Zhang, X.Y. Shen, and J.Y. Zhao, "Intuitionistic fuzzy Petri nets for knowledge representation and reasoning," *J. Digit. Inf. Manag.*, vol. 14, no. 2, pp. 104-113, 2016.
- [21] R. Akhoondi and R. Hossini, "A Novel Fuzzy-Genetic Differential Evolutionary Algorithm for Optimization of A Fuzzy Expert Systems Applied to Heart Disease Prediction," *Soft Comput. J.*, vol. 6, no. 2, pp. 32-47, 2017, doi: 10.1001.1.23223707.1396.6.2.3.7 [In Persian].
- [22] H. Abbasi, M. Shamsi, and A. Rasuli-Kenari, "Approaches of user activity detection and a new fuzzy logic-based method to determine the risk amount of user unusual activity in the smart home," *Soft Comput. J.*, vol. 9, no. 2, pp. 2-13, 2020, doi: 10.22052/scj.2021.242812.0 [In Persian].
- [23] E. Afarande and R. Hosseini, "An automatic Model for Managing Uncertainty and Rule Extraction in Form of Fuzzy Rules using Genetic Algorithm," *Soft Comput. J.*, vol. 9, no. 1, pp. 14-25, 2020, doi: 10.22052/scj.2021.111449 [In Persian].
- [24] C.L. Heitmeyer, "Software Cost Reduction," in *Encyclopedia of Software Engineering*, John Wiley & Sons, Inc., 2002.
- [25] S.M. Babamir and S. Jalili, "An approach for dynamic and logic-based verification of distributed systems", in *11th Annual Conf. Comput. Soc. Iran*, Tehran, 2005 [In Persian].

- [26] J. Goh, S. Adepu, K.N. Junejo, and A. Mathur, "A Dataset to Support Research in the Design of Secure Water Treatment Systems," in 11th Int. Conf. Crit. Inf. Infrastructures Secur., France, 2016, doi.org/10.1007/978-3-319-71368-7_8.