

یک چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره برای ارزیابی و انتخاب کنترلرهای شبکه‌های نرم‌افزارمحور در بستر اینترنت اشیای صنعتی با رویکرد تحلیل سلسله‌مراتبی

احمد جلیلی^{۱*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۱۳

چکیده

رشد روزافزون اینترنت اشیای صنعتی و گذار به سمت انقلاب صنعتی چهارم، نیازمند زیرساخت‌های ارتباطی با قابلیت تضمین کیفیت سرویس سخت‌گیرانه، نظیر تأخیر پردازشی کمینه، پایداری بالا و قطعیت عملیاتی است. در این راستا، فناوری شبکه‌های نرم‌افزارمحور (SDN) با جداسازی سطح کنترل از سطح داده، راهکاری تحول‌آفرین برای مدیریت پویای شبکه‌های صنعتی ارائه می‌دهد. با این حال، با توجه به چالش نقطه شکست واحد (SPOF)، انتخاب پلتفرم کنترل بهینه در محیط‌های حساس صنعتی، به دلیل وجود معیارهای فنی متضاد، یک مسئله پیچیده تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) محسوب می‌شود. در این مقاله، یک چارچوب ارزیابی سیستماتیک مبتنی بر فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) جهت انتخاب مناسب‌ترین کنترلر توزیع‌شده و ترکیبی SDN در بستر IIoT ارائه شده است. به این منظور، ۱۰ معیار استراتژیک (از جمله کارایی، مقیاس‌پذیری، تعادل بار و پشتیبانی از شبکه‌های سنتی) استخراج و ماتریس مقایسات زوجی از طریق یک پنل خبرگان چندرشته‌ای و روش تجمع میانگین هندسی تشکیل گردید. همچنین، جهت غلبه بر چالش داده‌های توصیفی، یک مکانیزم نگاشت ریاضی نوین و هم‌ریخت با مقیاس بنیادین ساعتی [۹، ۱/۹] طراحی شد تا ویژگی‌های کیفی ۶ کنترلر شاخص به مقادیر کمی پیوسته تبدیل شوند. خروجی مدل نشان می‌دهد که معیارهای کارایی و مقیاس‌پذیری با اختصاص مجموعاً ۵۰.۲۸ درصد، و تعادل بار و پشتیبانی از تجهیزات سنتی با ۲۶.۰۲ درصد، بالاترین وزن تصمیم‌گیری را دارند. در رتبه‌بندی حاصل، پلتفرم OpenDaylight با کسب امتیاز ۰.۲۵۰۱ در جایگاه نخست قرار گرفت. تحلیل حساسیت در قالب ۴ سناریوی تنش عملیاتی (شامل محیط‌های میراثی، تمام SDN و اوزان برابر) پایداری قطعی این رتبه‌بندی را با واریانس صفر ۰.۰۰۰۰ به اثبات رساند و تطبیق با آزمون‌های تجربی Cbench صحت این اولویت‌بندی را تایید نمود. یافته‌های پژوهش دلالت بر آن دارد که برازندگی ساختاری این کنترلر ناشی از برقراری توازن هوشمندانه میان کارایی بالا، تنوع گسترده رابط‌های رو به پایین و قابلیت یکپارچه‌سازی با تجهیزات سنتی است که امکان گذار تدریجی و بدون وقفه خطوط تولید به سمت نسل نوین شبکه را فراهم می‌سازد.

واژگان کلیدی: اینترنت اشیای صنعتی، شبکه‌های نرم‌افزارمحور، انتخاب کنترلر، تصمیم‌گیری چندمعیاره، فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، تحلیل حساسیت.

^۱ نویسنده مسئول، استادیار و عضو هیات علمی گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه گنبد کاووس، گلستان، ایران jalili@gonbad.ac.ir

۱. مقدمه

در طول دهه گذشته، جهان شاهد تحولی بنیادین در پارادایم‌های تولید و مدیریت صنعتی بوده است که از آن تحت عنوان «انقلاب صنعتی چهارم» یا صنعت ۴.۰ یاد می‌شود. هسته مرکزی این تحول، ادغام سیستم‌های فیزیکی با زیرساخت‌های دیجیتال است که منجر به پیدایش مفهوم «اینترنت اشیا صنعتی» (IIoT) شده است. IIoT تنها به معنای اتصال دستگاه‌ها به اینترنت نیست، بلکه به معنای ایجاد یک اکوسیستم هوشمند و خودکار است که در آن هزاران سنسور، عملگر، ربات‌های همکار و سیستم‌های کنترل منطقی برنامه‌پذیر (PLC) در یک شبکه یکپارچه با یکدیگر تعامل دارند [۱]. هدف نهایی این فناوری، دستیابی به سطوح بالاتری از بهره‌وری، انعطاف‌پذیری در تولید و کاهش هزینه‌های عملیاتی است. با این حال، تحقق این اهداف به شدت به زیرساخت ارتباطی وابسته است که بتواند ترافیک حجیم و حساس به زمان تولید شده در محیط‌های صنعتی را با دقت بالا جابجا کند.

در محیط‌های صنعتی، استفاده از سیستم‌های سایبر-فیزیکی، ربات‌های متحرک خودران (AGVs) و سامانه‌های اینترنت اشیا، نیازمند پوشش مناسب، اتصال پایدار و یک لایه کنترل چابک و نرم‌افزارمحور است [۲] [۳]. برخلاف بسیاری از کاربردهای عمومی اینترنت اشیا، در IIoT تأخیر، نوسان تأخیر (Jitter)، قابلیت اطمینان (Reliability) و قطعیت (Determinism) الزامات اساسی کیفیت سرویس (QoS) محسوب می‌شوند [۴]. از این رو، شبکه صنعتی باید بتواند ترافیک‌های با اولویت‌های مختلف را به صورت هوشمند مدیریت و منابع ارتباطی را متناسب با نیازهای هر کاربرد تخصیص دهد؛ زیرا تأخیر یا از دست رفتن داده‌های کنترلی می‌تواند عملکرد تجهیزات، تداوم تولید و ایمنی محیط صنعتی را تحت تأثیر قرار دهد. چرا که هرگونه تأخیر در رسیدن یک سیگنال کنترلی یا از دست رفتن یک بسته داده مربوط به وضعیت اضطراری، می‌تواند منجر به توقف خط تولید، آسیب به تجهیزات گران‌قیمت و یا حتی ایجاد خطرات جانی برای نیروی انسانی شود [۵] [۶].

شبکه‌های صنعتی سنتی که عمدتاً بر پایه پروتکل‌های اترنت صنعتی سخت و سخت‌افزارهای اختصاصی بنا شده‌اند، امروزه به گلوگاهی برای توسعه IIoT تبدیل شده‌اند. معماری این شبکه‌ها به صورت توزیع شده و غیرمتمرکز است، به این معنی که سطح کنترلی (Control Plane) و سطح داده (Data Plane) در داخل هر سوئیچ و روتر با یکدیگر ترکیب شده‌اند. این موضوع باعث می‌شود که پیکربندی دستی هزاران گره شبکه کاری طاقت‌فرسا، مستعد خطا و بسیار پرهزینه باشد [۷]. علاوه بر این، شبکه‌های سنتی فاقد قابلیت برنامه‌ریزی پویا هستند؛ یعنی نمی‌توانند به سرعت خود را با تغییرات لحظه‌ای در نیازهای برنامه‌های صنعتی یا بارهای ترافیکی پیش‌بینی نشده وفق دهند. این عدم انعطاف‌پذیری باعث شده است که مدیران شبکه در مواجهه با سناریوهای پویای صنعت ۴.۰، با مشکلاتی نظیر مدیریت پیچیده، عدم قابلیت رویت شبکه (Visibility) و دشواری در اعمال سیاست‌های امنیتی یکپارچه روبرو شوند [۸]. برای غلبه بر محدودیت‌های ذکر شده، فناوری شبکه‌های نرم‌افزارمحور (SDN) به عنوان یک راهکار انقلابی معرفی شده است. SDN با معرفی یک معماری نوین، سطح کنترلی را از سطح داده جدا کرده و مدیریت هوشمند شبکه را در یک عنصر مرکزی به نام «کنترلر» متمرکز می‌کند [۹]. این جداسازی، شبکه را از یک زیرساخت سخت‌افزارمحور صلب به یک محیط نرم‌افزارمحور برنامه‌پذیر تبدیل می‌کند. در این ساختار، سوئیچ‌ها تنها وظیفه هدایت بسته‌ها (Forwarding) را بر عهده دارند و تمامی تصمیمات هوشمندانه درباره مسیر یابی، مدیریت پهنای باند و امنیت توسط کنترلر اتخاذ شده و از طریق رابط‌های رو به پایین (Southbound APIs) مانند پروتکل OpenFlow به تجهیزات دیکته می‌شود. این ویژگی به مدیران اجازه می‌دهد تا دیدی جامع نسبت به کل شبکه داشته باشند و به صورت بلادرنگ ترافیک را بهینه‌سازی کنند که این امر مستقیماً به بهبود شاخص‌های QoS در IIoT کمک می‌کند [۱۰].

کنترلر SDN به عنوان «مغز متفکر» شبکه عمل می‌کند و عملکرد کل سیستم به توانمندی‌های این عنصر وابسته است. با گسترش SDN، کنترلرهای متعددی توسعه یافته‌اند که هر کدام

دارای ویژگی‌ها، معماری‌ها و قابلیت‌های عملکردی متفاوتی هستند. برخی از این کنترلرها دارای ساختار متمرکز هستند که مدیریت را ساده می‌کنند اما با خطر نقطه شکست واحد (Single Point of Failure) مواجه‌اند؛ در حالی که برخی دیگر از معماری‌های توزیع‌شده بهره می‌برند تا مقیاس‌پذیری و تاب‌آوری را افزایش دهند [۱۱]. تنوع گزینه‌ها (مانند OpenDaylight, Ryu, Floodlight و غیره) و تفاوت در زبان‌های برنامه‌نویسی، پشتیبانی از پروتکل‌ها و ماژول‌های داخلی، فرآیند انتخاب را برای سازمان‌های صنعتی بسیار پیچیده کرده است. یک انتخاب نادرست می‌تواند منجر به افزایش تأخیر پردازشی در کنترلر و در نتیجه، نقض الزامات بلادرنگ در شبکه صنعتی شود.

انتخاب یک کنترلر SDN برای محیط IIoT یک مسئله تک‌بعدی نیست که تنها با بررسی سرعت پردازش بسته‌ها حل شود. در واقع، این یک مسئله تصمیم‌گیری چندمعیاره است که در آن باید توازنی میان معیارهای متضاد برقرار کرد. برای مثال، ممکن است یک کنترلر کارایی بالایی داشته باشد، اما از نظر مستندات و پشتیبانی از تجهیزات قدیمی ضعیف باشد. یا کنترلری دیگر مقیاس‌پذیری فوق‌العاده‌ای داشته باشد، اما پیکربندی و ماژولار بودن آن بسیار پیچیده باشد [۱۲]. با توجه به اینکه اهمیت این معیارها در محیط‌های صنعتی متفاوت از محیط‌های مرکز داده یا شبکه‌های سازمانی است، نیاز به یک متدولوژی علمی و ریاضیاتی احساس می‌شود که بتواند این اولویت‌ها را به دقت وزن‌دهی کرده و بر اساس تحلیل‌های کمی و کیفی، بهترین گزینه را پیشنهاد دهد.

علیرغم وجود مطالعات متعدد در زمینه مقایسه کنترلرهای SDN، اکثر پژوهش‌های پیشین بر ارزیابی‌های صرفاً آزمایشگاهی و سناریوهای ترافیکی عمومی تمرکز داشته‌اند. بسیاری از این مطالعات از معیارهای خاص صنعت مانند پشتیبانی از شبکه‌های سنتی یا تعادل بار در محیط‌های بلادرنگ غافل مانده‌اند. همچنین، فقدان یک چارچوب جامع که بتواند ویژگی‌های کیفی (مانند تکامل و مستندات) را در کنار ویژگی‌های کمی (مانند نرخ پردازش) به صورت همزمان مدلسازی کند، در ادبیات فنی این حوزه مشهود است [۱۳]. این

مقاله با درک این شکاف، در صدد است تا با استفاده از روش فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی AHP، یک مدل ارزیابی اختصاصی برای کاربردهای IIoT ارائه دهد. روش AHP به دلیل توانایی در ساختاردهی به مسائل پیچیده و سنجش نرخ ناسازگاری در قضاوت‌های کارشناسی، ابزاری ایده‌آل برای این پژوهش است. هدف اصلی این مقاله، ارائه یک چارچوب تصمیم‌گیری معتبر برای انتخاب مناسب‌ترین کنترلر SDN در لایه کنترل شبکه‌های صنعتی است. نوآوری‌های برجسته این تحقیق را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

- شناسایی و تعریف ۱۰ معیار استراتژیک که به طور اختصاصی بر اساس نیازمندی‌های QoS در IIoT استخراج شده‌اند.
- به‌کارگیری روش AHP برای برقراری مقایسات زوجی میان معیارها و تعیین دقیق وزن هر معیار با تمرکز بر کاهش تأخیر و اتلاف بسته.
- ارائه و استفاده از یک مکانیزم نگاشت نوین برای تبدیل مشخصات کیفی کنترلرها به مقادیر کمی جهت ورود به مدل ریاضی.
- ارزیابی جامع ۶ کنترلر شاخص (Onix, Ravana, OpenDaylight, ONOS, Fibbing, SDNp) و رتبه‌بندی آن‌ها بر اساس سناریوهای واقعی صنعت.

ساختار ادامه این مقاله به شرح زیر سازمان‌دهی شده است: در بخش ۲، مبانی نظری شبکه‌های IIoT، معماری کنترل‌کننده‌های SDN و پیشینه پژوهش‌های انجام‌گرفته در این حوزه مورد واکاوی قرار می‌گیرد. بخش ۳ به تشریح دقیق روش‌شناسی پیشنهادی اختصاص دارد؛ در این بخش، راهبرد گزینش کاندیدها، معیارهای ده‌گانه ارزیابی، چارچوب ریاضی فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و مکانیزم نوین نگاشت داده‌ها تبیین می‌گردند. در بخش ۴، مدل طراحی‌شده پیاده‌سازی می‌گردد و پس از استخراج اوزان و اعمال تابع نگاشت بر روی ۶ کنترل‌کننده کاندید، نتایج رتبه‌بندی نهایی همراه با تحلیل‌های تخصصی و مهندسی ارائه می‌شود. در نهایت، بخش ۵ به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری از دستاوردهای پژوهش پرداخته و مسیرهای ممکن برای مطالعات آتی را ترسیم می‌نماید.

۲. پیشینه پژوهش و مبانی نظری

در این بخش، ابتدا به طبقه‌بندی معماری‌های مختلف کنترلرهای SDN پرداخته می‌شود و سپس مطالعات پیشین در زمینه انتخاب کنترلر با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره و چالش‌های خاص شبکه‌های IIoT مورد واکاوی قرار می‌گیرد.

طبقه‌بندی معماری کنترلرهای SDN در ادبیات فنی:
در نخستین سال‌های ظهور SDN، کنترلرها عمدتاً با ساختاری متمرکز طراحی می‌شدند. نمونه‌های اولیه‌ای مانند NOX و Beacon بر این اساس بنا شدند که تمام هوش شبکه در یک نقطه واحد مستقر باشد. با این حال، پژوهش‌های بعدی نشان داد که معماری متمرکز برای محیط‌های حساس و وسیع مانند IIoT با چالش‌های جدی در زمینه نقطه شکست واحد و تنگنای مقیاس‌پذیری روبروست [۱۴].

در پاسخ به این محدودیت‌ها، محققان به سمت توسعه کنترلرهای توزیع‌شده سوق پیدا کردند. مطالعات افرادی نظیر راشل و همکاران [۱۵] نشان می‌دهد که کنترلرهایی مانند ONOS و OpenDaylight با بهره‌گیری از یک لایه انتزاعی توزیع‌شده، ضمن حفظ دید جامع بر شبکه، پایداری و تاب‌آوری سیستم را به شدت افزایش می‌دهند. در سال‌های اخیر، دسته سومی تحت عنوان کنترلرهای ترکیبی (Hybrid) نیز ظهور کرده‌اند که هدف آن‌ها برقراری پل ارتباطی میان پروتکل‌های سنتی و SDN است؛ این دسته به‌ویژه در محیط‌های صنعتی که امکان تعویض یک‌باره تمامی تجهیزات میراثی وجود ندارد، اهمیت دوچندانی یافته‌اند [۱۶].

ارزیابی عملکرد و شاخص‌های QoS در محیط‌های صنعتی: یکی از محورهای اصلی پژوهش در حوزه IIoT، تضمین کیفیت سرویس (QoS) است. کریستو و همکاران [۱۷] در مطالعه‌ای بر روی ترافیک شبکه‌های صنعتی، مدل‌های هفت‌بعدی برای جریان ترافیک ارائه کردند تا تأثیر تعداد کنترلرها را بر تأخیر شبکه بسنجند. یافته‌های آن‌ها تأکید می‌کند که در شبکه‌های نرم‌افزارمحور صنعتی، انتخاب کنترلر مستقیماً بر نرخ اتلاف بسته و زمان پاسخ‌دهی سنسورها اثرگذار است.

همچنین، در حوزه امنیت و پایداری، تحقیقات نجار و همکاران [۱۸] نشان می‌دهد که استفاده از SDN در IIoT می‌تواند به مدیریت پویای خطاها و مقابله با حملات منع سرویس (DDoS) کمک کند، مشروط بر اینکه کنترلر منتخب دارای توان پردازشی و ماژول‌های امنیتی کافی باشد. این مطالعات تأیید می‌کنند که کارایی تنها یکی از چندین شاخص مورد نیاز برای یک شبکه صنعتی است.

از سوی دیگر، پایداری و کارایی شبکه‌های صنعتی به تأمین امنیت آن‌ها وابسته است. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که روش‌های ترکیبی تشخیص نفوذ، مبتنی بر شبکه‌های عصبی پیچشی و الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری، مانند بهینه‌ساز گرگ خاکستری، می‌توانند نقش مؤثری در شناسایی و مقابله با حملات پیچیده در ترافیک حساس IIoT ایفا کنند [۱۹]. استفاده از این سازوکارهای امنیتی در کنار کنترلر، نیازمند مدیریت و تخصیص مناسب منابع پردازشی در لایه کنترل است.

کاربرد روش‌های MCDM در انتخاب کنترلر: از آنجا که انتخاب کنترلر SDN شامل متغیرهای متضاد و پیچیده است، استفاده از متدهای تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) به یکی از رویکردهای اصلی پژوهشگران تبدیل شده است.

از سوی دیگر، به‌کارگیری یادگیری تقویتی مبتنی بر یادگیری فعال برای بهبود فرآیندهای کنترل و تصمیم‌گیری بهینه، بیانگر حرکت سامانه‌های خودکار به سمت رویکردهای ترکیبی و هوشمند است. در این راستا، چارچوب ارزیابی ارائه‌شده در این مقاله [۲۰] می‌تواند مبنایی مناسب برای انتخاب کنترل‌کننده متناسب با اجرای این فرآیندها فراهم کند.

یکی از پژوهش‌های مرجع در این زمینه، کار دورکادوی و همکاران در سال ۲۰۲۲ است [۲۱]. آن‌ها از روش فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) برای ارزیابی ویژگی‌هایی نظیر قابلیت اطمینان، امنیت و بهره‌وری در کنترلرهای SDN استفاده کردند. اگرچه مطالعه آن‌ها در زمان خود پیشرو بود، اما به دلیل نوبا بودن فناوری در آن سال، بسیاری از کنترلرهای قدرتمند امروزی (نظیر ONOS) و الزامات خاص صنعت ۴.۰ در مدل آن‌ها لحاظ نشده بود.

معیارهای کیفی (مانند مستندات و تکامل) را بدون در نظر گرفتن محدودیت‌های بلادرنگ صنعت بررسی کرده‌اند.

پژوهش حاضر با ترکیب متدولوژی AHP و یک مکانیزم نگاشت دقیق، تلاش می‌کند تا این شکاف را پر کند. ما نه تنها کنترلرهای مدرن را بر اساس معیارهای فنی مقایسه می‌کنیم، بلکه با وزن‌دهی به پارامترهایی نظیر تعادل بار و پشتیبانی از شبکه‌های سنتی (که در محیط‌های صنعتی حیاتی هستند)، مدلی جامع و متناسب با نیازهای صنعت ۴.۰ ارائه می‌دهیم. این رویکرد به مدیران شبکه اجازه می‌دهد تا انتخابی داشته باشند که نه تنها در آزمایشگاه، بلکه در کف کارخانه (Shop Floor) نیز کارآمد باشد.

۳. روش پیشنهادی

در این پژوهش، یک مدل جامع تصمیم‌گیری چندمعیاره (MCDM) جهت ارزیابی و انتخاب بهینه کنترل‌کننده در شبکه‌های نرم‌افزارمحور صنعتی (SDN-based IIoT) طراحی شده است. پیچیدگی محیط‌های صنعتی و تضاد میان شاخص‌های عملکردی، ایجاب می‌کند که فرآیند انتخاب فراتر از بررسی‌های تک‌بعدی آزمایشگاهی باشد. لذا، متدولوژی حاضر با تلفیق معیارهای فنی استخراج‌شده از نیازمندی‌های صنعت ۴.۰ و مدل ریاضی فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)، چارچوبی متقن برای رتبه‌بندی کنترل‌کننده‌ها ارائه می‌دهد. این مدل بر پایه ترکیب فرآیند AHP و یک سیستم نگاشت عددی برای تبدیل ویژگی‌های کیفی به مقادیر کمی بنا شده است.

۱.۳. راهبرد گزینش و منطق غربالگری کنترلرهای

کاندید

فرآیند انتخاب گزینه‌های ارزیابی در این پژوهش، بر پایه یک غربالگری دومارحله‌ای مبتنی بر الزامات تاب‌آوری صنعتی صورت پذیرفته است. در مرحله نخست، معیار معماری هسته (Core Architecture) به عنوان فیلتر اولیه اعمال گردید. با توجه به ماهیت حساس به زمان و مأموریت‌حیاتی (Mission-Critical) شبکه‌های IIoT، استقرار کنترلرهایی با معماری متمرکز (Centralized) به دلیل ریسک بروز نقطه شکست واحد و عدم توانایی در پاسخگویی به ترافیک‌های انفجاری سنسورها غیرقابل قبول است. بر این اساس، کنترلرهای محبوب و

در سال‌های بعد، پژوهشگران از متدهای دیگری نیز بهره جستند. برای مثال، علی و همکاران [۲۲] از روش فرآیند شبکه تحلیلی (ANP) برای مدل‌سازی وابستگی‌های متقابل میان معیارهای انتخاب استفاده کردند. همچنین، استفاده از روش TOPSIS مبتنی بر آنتروپی توسط یوسف و همکاران [۲۳] نشان داد که می‌توان با استفاده از وزن‌دهی آماری، دقت رتبه‌بندی کنترلرها را در سناریوهای ابری بهبود بخشید. با این وجود، روش AHP به دلیل سادگی ساختاری، قابلیت سنجش سازگاری در قضاوت‌های کیفی و امکان سلسله‌مراتب‌بندی معیارها، همچنان به عنوان یکی از محبوب‌ترین رویکردها در مقالات علمی شناخته می‌شود.

مقایسه کنترلرهای شاخص در پژوهش‌های تجربی:

مطالعات تجربی متعددی به مقایسه مستقیم کنترلرهای مطرح پرداخته‌اند. در بسیاری از این پژوهش‌ها، کنترلر OpenDaylight به دلیل ماژولار بودن فوق‌العاده و پشتیبانی گسترده از پروتکل‌های مختلف، به عنوان یک گزینه چندمنظوره برای محیط‌های صنعتی معرفی شده است [۲۴]. در مقابل، کنترلر ONOS در پژوهش‌هایی که تمرکز آن‌ها بر شبکه‌های اپراتوری و پایداری در مقیاس بسیار بزرگ بوده، امتیازات بالاتری کسب کرده است [۲۵].

کنترلرهای سبک‌تری مانند Ryu نیز در مطالعاتی که هدف آن‌ها سادگی در برنامه‌نویسی و توسعه سریع ماژول‌های پایتون بوده، مورد توجه قرار گرفته‌اند [۲۶]. با این حال، در محیط‌های IIoT که نیاز به یکپارچگی با تجهیزات لایه فیلد (Fieldbus) و پروتکل‌های اترنت صنعتی وجود دارد، کنترلرهایی که قابلیت پشتیبانی از شبکه‌های سنتی (Legacy Support) را دارند، در اولویت پژوهشی قرار گرفته‌اند.

جایگاه پژوهش حاضر و شناسایی شکاف موجود: با بررسی ادبیات موجود، می‌توان دریافت که اگرچه ابزارهای MCDM و ارزیابی‌های عملکردی به طور جداگانه مورد مطالعه قرار گرفته‌اند، اما شکافی در زمینه ارائه یک مدل وزن‌دهی اختصاصی برای محیط IIoT وجود دارد. اکثر مطالعات قبلی یا صرفاً به جنبه‌های فنی (مانند Throughput) پرداخته‌اند و یا

برکاربرد نظیر Ryu و Floodlight، علی‌رغم کارایی بالا در محیط‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی، به دلیل تکیه بر معماری پایه متمرکز و عدم برخورداری ذاتی از لایه توزیع‌شده و همگام‌سازی اجماع (Consensus Clustering) از دایره ارزیابی این پژوهش کنار گذاشته شدند.

در مرحله دوم، به منظور ارزیابی جامع الگوهای معماری در محیط‌های صنعتی، ۶ کنترلر به عنوان نمایندگان سه الگوی اصلی معماری توزیع‌شده و هیبرید انتخاب شدند:

۱. پلتفرم‌های جامع سازمانی و نسل نوین (Enterprise/Carrier-Grade Distributed): کنترلرهای OpenDaylight (ODL) و ONOS به عنوان پیشرفته‌ترین و فعال‌ترین پلتفرم‌های متن‌باز توزیع‌شده که به ترتیب از معماری‌های خوشه‌بندی Akka و پروتکل‌های اجماع مبتنی بر Raft/Atomix بهره می‌برند.

۲. کهن‌الگوهای توزیع وضعیت و تحمل‌پذیری خطا (Distributed & Fault-Tolerant Archetypes): کنترلر Onix به عنوان سنگ‌بنا و کهن‌الگوی شبکه‌های توزیع‌شده با پایگاه داده حالات شبکه (NIB)، و کنترلر Ravana به عنوان نماد معماری‌های مبتنی بر تراکنش‌های قطعی و تحمل‌پذیری خطای بدون حالت Split-Brain.

۳. کنترلرهای ترکیبی جهت محیط‌های سنتی (Hybrid Brownfield Archetypes): کنترلرهای Fibbing و SDNp به عنوان پیشگامان تزریق متمرکز سیاست‌ها به پروتکل‌های مسیریابی توزیع‌شده سنتی (مانند OSPF و BGP)، که نقشی کلیدی در گذار مرحله‌ای کارخانجات به سمت نسل چهارم صنعت ایفا می‌کنند.

بدین ترتیب، این پژوهش با تلفیق پلتفرم‌های فعال عملیاتی و کهن‌الگوهای برجسته معماری، مقایسه‌ای ساختاریافته میان تمامی نگرش‌های لایه کنترل SDN در بستر صنعت ۴.۰ ارائه می‌دهد.

۲.۳. تبیین معیارهای ده‌گانه ارزیابی در بستر صنعت جهت سنجش جامع کنترل‌کننده‌ها، ۱۰ معیار استراتژیک استخراج گردید [۲۷] [۲۸]. این معیارها دقیقاً بر اساس

نیازمندی‌های کیفیت سرویس (QoS) و محدودیت‌های عملیاتی در انقلاب صنعتی چهارم تعریف شده‌اند:

۱. کارایی: این معیار فراتر از نرخ پردازش بسته‌ها، به زمان پاسخ‌دهی کنترلر به درخواست‌های جریان در شرایط بار ترافیکی بالا اشاره دارد.

۲. مقیاس‌پذیری: توانایی کنترلر در حفظ پایداری صفحه کنترل هنگام اتصال هزاران گره IIoT و مدیریت همزمان چندین سوئیچ مجازی و فیزیکی.

۳. تعادل بار: مکانیسم‌های توزیع هوشمند درخواست‌ها بین خوشه‌های کنترلری جهت جلوگیری از اشباع پردازشی در یک گره خاص.

۴. پشتیبانی از شبکه‌های سنتی: یکی از حیاتی‌ترین معیارها در صنعت، توانایی کنترلر در تعامل با پروتکل‌های غیراستاندارد و تجهیزات سنتی (Non-SDN) از طریق واسط‌های ترجمه است. ۵. غنای مستندات فنی: وجود منابع آموزشی و کتابخانه‌های مرجع که زمان توسعه و عیب‌یابی کاربردها را کاهش می‌دهد. ۶. معماری ماژولار: قابلیت اضافه یا حذف کردن توابع (مانند مدیریت امنیت یا مسیریابی) بدون اختلال در عملکرد هسته کنترل‌کننده.

۷. تنوع رابط‌های رو به پایین (Southbound Interface): گستره پشتیبانی از پروتکل‌هایی نظیر OpenFlow (نسخه‌های مختلف)، NETCONF، و OVSDB که امکان کنترل تجهیزات متنوع را فراهم می‌کند.

۸. سازگاری پلتفرم: قابلیت اجرا بر روی سیستم‌عامل‌های توزیع‌شده و محیط‌های ابری/مه (Cloud/Fog Computing).

۹. قابلیت‌های مجازی‌سازی: توانایی انتزاع منابع فیزیکی شبکه و ایجاد شبکه‌های منطقی ایزوله برای کاربردهای مختلف صنعتی.

۱۰. سطح تکامل و پایداری فنی (Evolution & Stability): این معیار به پایداری کدهای منبع، فراوانی نسخه‌های عرضه شده و سوابق به‌کارگیری موفق در پروژه‌های صنعتی بزرگ اشاره دارد.

۳.۳. پیاده‌سازی متدولوژی ریاضی AHP

نماد A نشان داده می‌شود، یک ماتریس متقابل است؛ بدین معنا که اگر اهمیت معیار i نسبت به معیار j برابر با n باشد ($a_{ij} = n$)، آنگاه اهمیت معیار j نسبت به معیار i معادل معکوس آن خواهد بود ($a_{ji} = 1/n$). این خاصیت تضمین می‌کند که منطق ریاضی حاکم بر ترجیحات، یکپارچه باقی بماند.

مقادیر حاصله پس از گرد شدن به نزدیک‌ترین مقادیر جدول ساعتی، ساختار نهایی ماتریس الزامات (جدول ۲) را تشکیل خواهند داد، که نرخ ناسازگاری آن ($CR=0.0304$) موید همگرایی و انطباق بالای نظرات اعضای پنل است.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix}$$

جدول ۱. مقیاس امتیازدهی ساعتی برای مقایسات زوجی.

توضیح تخصصی	تعریف مفهومی	امتیاز عددی
دو معیار سهم مساوی در هدف دارند	اهمیت یکسان	۱
اولویت خفیف یک معیار نسبت به دیگری	اهمیت کمی بیشتر	۳
اولویت قوی و مدلل یک معیار	اهمیت اساسی	۵
برتری کاملاً محسوس یک معیار در سناریو	اهمیت بسیار قوی	۷
شواهد قطعی بر برتری بلامنازع یک معیار	اهمیت مطلق	۹
فواصل بین امتیازات اصلی	مقادیر میانی	۲، ۴، ۶، ۸

۲.۳.۳. گام دوم: استخراج بردار اولویت و وزن‌دهی

پس از تشکیل ماتریس مقایسات زوجی A در گام نخست، مرحله دوم شامل فرآیند نرمال‌سازی و استخراج بردار ویژه است که وزن نسبی هر معیار را مشخص می‌کند. این بردار نشان‌دهنده ضریب اهمیت هر شاخص در انتخاب نهایی کنترل‌کننده SDN برای محیط IIoT است. برای دستیابی به مقادیر دقیق وزن‌ها، از روش میانگین حسابی بردار نرمال‌شده استفاده شده است. این فرآیند شامل سه مرحله فرعی است:

۱. **مجموع ستونی:** ابتدا مجموع مقادیر هر ستون j در

ماتریس A محاسبه می‌شود. (رابطه-۲)

$$C_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} \quad (2)$$

۲. **نرمال‌سازی:** هر عنصر a_{ij} بر مجموع ستون خود C_j تقسیم

می‌شود تا ماتریس نرمال‌شده به دست آید. در این ماتریس، مجموع عناصر هر ستون دقیقاً برابر با ۱ است.

فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی در این پژوهش به عنوان موتور استنتاجی جهت حل مسئله تصمیم‌گیری چندمعیاره به کار گرفته شده است. این فرآیند بر پایه چهار گام عملیاتی استوار است که توازن میان شاخص‌های کیفی و کمی را تضمین می‌کند [۲۹]. روش AHP به دلیل توانایی در تبدیل قضاوت‌های ذهنی به داده‌های عددی دقیق و بررسی سازگاری تصمیمات، انتخاب گردید. مراحل پیاده‌سازی در سه گام اصلی به شرح زیر اجرا گردید [۳۰]:

۱.۳.۳. گام اول: مقیاس امتیازدهی و تشکیل ماتریس

مقایسات زوجی

نخستین و حساس‌ترین گام در فرآیند AHP، تعیین مراتب اهمیت معیارها نسبت به یکدیگر در قالب مقایسات دوتایی است. به منظور پیشگیری از هرگونه سوگیری فردی و تضمین انطباق ماتریس مقایسات با نیازمندی‌های دنیای واقعی صنعت، منشأ استخراج داده‌های جدول ۲ بر پایه تشکیل یک پنل خبرگان پنج‌نفره ($m=5$) استوار گردید. اعضای این پنل متشکل از دو عضو هیئت علمی دانشگاهی با تخصص در شبکه‌های مبتنی بر نرم‌افزار (SDN)، دو مهندس ارشد اتوماسیون و شبکه با بیش از ۸ سال سابقه استقرار سیستم‌های SCADA و ارتباطات فیلدباس در خطوط تولید صنعتی، و یک کارشناس امنیت زیرساخت‌های IIoT بودند.

مبانی امتیازدهی و خاصیت تقابل: ابزار گردآوری داده‌ها،

یک پرسشنامه استاندارد مقایسات زوجی بر پایه مقیاس ۱ تا ۹ ساعتی است. جدول ۱ مقیاس امتیازدهی ساعتی برای مقایسات زوجی را نشان می‌دهد به طوری که $1 = \text{اهمیت یکسان}$ و $9 = \text{اهمیت مطلق می‌باشد}$. جهت تجمیع قضاوت‌های فردی خبرگان و ایجاد ماتریس مقایسات زوجی نهایی ($A=[a_{ij}]$)، از روش میانگین هندسی (Geometric Mean) مطابق با رابطه (۱) استفاده شده است؛ چراکه این روش تنها عملگر تجمیعی است که ویژگی تقابل ($a_{ji}=1/a_{ij}$) را در ماتریس حاصله حفظ می‌نماید:

$$a_{ij} = \left(\prod_{k=1}^m a_{ij}^{(k)} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (1)$$

که در آن $a_{ij}^{(k)}$ بیانگر قضاوت خبره k -ام در مقایسه اهمیت معیار i نسبت به معیار j است. ماتریس مقایسات زوجی که با

۴.۳. طراحی مکانیزم نگاشت نوین برای ویژگی‌های کیفی

یکی از چالش‌های بنیادین در ارزیابی جامع کنترل‌کننده‌های SDN، ماهیت ناهمگن و توصیفی داده‌های عملکردی در کاتالوگ‌ها و اسناد فنی است (نظیر گزاره‌های **High**، **Medium**، **Low** و **Yes/No**) [۳۱] [۳۲]. مدل‌های ریاضی تصمیم‌گیری چندمعیاره نظیر **AHP**، نیازمند ورودی‌های عددی دقیق و بدون سوگیری هستند. بدین منظور، یک تابع نگاشت ریاضی قطعه‌ای-خطی $f(x)$ طراحی شد تا ویژگی‌های کیفی را به صورت خودکار و سیستماتیک به مقادیر کمی تبدیل نماید.

هدف این تابع $f(x)$ تخصیص یک ارزش عددی پیوسته در بازه مشخص به ویژگی‌های توصیفی است. در این پژوهش، از یک بازه استاندارد استفاده شده است:

- حداقل امتیاز: $f(x_{min})=0,11$ (بیانگر عدم وجود ویژگی یا عملکرد بسیار ضعیف)
- حداکثر امتیاز: $f(x_{max})=9,0$ (بیانگر عملکرد ایده‌آل و کامل)

با توجه به غیرخطی بودن ارزش ویژگی‌ها در شبکه‌های نرم‌افزارمحور، تابع نگاشت به صورت ترکیبی از تخصیص قطعی و درونیابی/برونیابی طراحی گردید:

- اگر ویژگی خارج از محدوده انتظار (پایین‌تر از مینیمم) باشد: $\forall x < x_0 \Rightarrow f(x) = 0,11$
- اگر ویژگی فراتر از سطح مطلوب (بالتر از ماکزیمم) باشد: $\forall x > x_n \Rightarrow f(x) = 9,0$

این تابع به دو صورت عمل می‌کند: (تخصیص گسسته) برای ویژگی‌های طبقه‌بندی شده (نظیر سطح مستندات)، مقادیر **High** و **Yes** به عدد ۹،۰، مقادیر **Medium** به ۵،۰ و مقادیر **Low** یا **No** به کمینه مقدار ۰،۱۱ نگاشت می‌شوند. (درونیابی خطی) برای ویژگی‌هایی که دارای مقیاس عددی متغیر هستند (نظیر سابقه توسعه به سال)، از معادله درونیابی خطی استفاده می‌شود تا مقادیر بین مرزهای حداقل و حداکثر به صورت پیوسته استخراج گردند.

منطق اجرایی این مکانیزم نوین در قالب الگوریتم-۱ تدوین شده است که امکان پیاده‌سازی خودکار این چارچوب را برای

۳. میانگین سطری (بردار اولویت): وزن نهایی هر معیار (W_i) از طریق میانگین‌گیری از عناصر سطر مربوطه در ماتریس نرمال‌شده حاصل می‌شود. (رابطه-۳)

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{a_{ij}}{c_j} \quad (3)$$

۳.۳.۳. گام سوم: تحلیل سازگاری و اعتبارسنجی

یکی از چالش‌های اساسی در فرآیندهای تصمیم‌گیری مبتنی بر قضاوت انسانی (نظیر ساخت ماتریس گام اول)، احتمال بروز خطای منطقی یا تناقض در امتیازدهی است (به عنوان مثال، اگر $A > B$ و $B > C$ ، منطقاً باید $A > C$ باشد). روش **AHP** با ارائه یک مکانیزم ریاضی قدرتمند، این تناقضات را تحت عنوان نرخ ناسازگاری (**CR**) پایش می‌کند. برای اعتبارسنجی مقایسات انجام شده در ماتریس الزامات (ماتریس **A**)، سه شاخص کلیدی محاسبه می‌گردد:

الف) بزرگترین مقدار ویژه ماتریس λ_{max} با ضرب ماتریس اولیه **A** در بردار اولویت (وزن‌ها، **W**)، بردار جدیدی به دست می‌آید. از تقسیم عناصر این بردار جدید بر عناصر متناظر در بردار اولویت و سپس میانگین‌گیری، λ_{max} محاسبه می‌شود (رابطه-۴):

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{W_i} \quad (4)$$

ب) شاخص سازگاری (**CI**): این شاخص میزان انحراف مقادیر ماتریس از حالت کاملاً سازگار (جایی که $\lambda_{max}=n$) را نشان می‌دهد (رابطه-۵):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

ج) نرخ ناسازگاری (**CR**): جهت استانداردسازی، شاخص سازگاری (**CI**) بر شاخص تصادفی (**RCI**) تقسیم می‌شود. **RCI** مقداری است که از میانگین‌گیری تصادفی ماتریس‌های هم‌مرتبه استخراج می‌شود. نرخ ناسازگاری براساس رابطه-۶) محاسبه می‌شود:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

در این متدولوژی، تنها در صورتی اوزان استخراج‌شده معتبر شناخته می‌شوند که شرط $CR \leq 0.1$ برقرار باشد.

سرویس انجام شده است. منطق استخراج مقادیر در ماتریس مقایسات زوجی به شرح زیر است:

• **اولویت مطلق کارایی و مقیاس پذیری:** با توجه به

ماهیت بلادرنگ شبکه‌های صنعتی، معیار کارایی نسبت به معیارهای مجازی سازی و سطح تکامل فنی امتیاز ۹ (اهمیت مطلق) دریافت کرد. همچنین این معیار نسبت به پلتفرم و رابط‌های جنوبی امتیاز ۷ (اهمیت بسیار قوی) و نسبت به مستندات امتیاز ۵ (اهمیت اساسی) دریافت نمود.

• **برابری کارایی و مقیاس پذیری:** از آنجا که یک شبکه

صنعتی کارآمد باید همزمان با سرعت بالا و در ابعاد وسیع عمل کند، امتیاز مقایسه‌ای این دو معیار نسبت به هم برابر با ۱ (اهمیت یکسان) لحاظ گردید.

• **اولویت عملیاتی تعادل بار:** معیار تعادل بار و

پشتیبانی از شبکه سنتی نسبت به مستندات امتیاز ۳ (اهمیت کمی بیشتر) دریافت کردند، چرا که پایداری عملیاتی بر سهولت توسعه مقدم است.

با توجه به استدلال‌های صورت گرفته، و اهمیت و اولویت معیارها در کیفیت سرویس شبکه، جدول ۲ ماتریس مقایسات زوجی معیارها را نشان می‌دهد.

در این ماتریس (جدول ۲)، قطر اصلی تماماً برابر با ۱ است (مقایسه هر معیار با خودش). مقادیر بالای قطر نشان‌دهنده ترجیحات مستقیم و مقادیر زیر قطر، معکوس آن‌ها هستند. این ساختار دقیقاً مبنای محاسباتی گام دوم (استخراج وزن‌ها) قرار گرفته است. غلبه اعداد بزرگ (۷ و ۹) در سطرها اول و دوم، نشان‌دهنده تمرکز شدید مدل بر پارامترهای فنی کلیدی در حوزه **IoT** است.

با اعمال روابط ریاضی نرمال سازی ستونی و میانگین گیری سطری بر روی ماتریس مقایسات زوجی معیارها (جدول ۲)، بردار اولویت (وزن نهایی معیارها) استخراج گردید که نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. توزیع این وزن‌ها بازتاب‌دهنده نیازمندی‌های بلادرنگ در حوزه صنعت ۴.۰ است. این توزیع وزنی مستدل، مبنای محاسباتی مرحله بعد (ارزیابی نهایی کنترلرها) را تشکیل می‌دهد.

هر کنترلر جدیدی فراهم می‌سازد. با استفاده از این الگوریتم، پروفایل عملکردی هر کنترلر به یک بردار عددی تبدیل می‌شود که قابلیت ضرب ماتریسی در اوزان استخراج شده از **AHP** را خواهد داشت.

Algorithm 1: Mapping SDN Controller Attributes to AHP Scale

Input: Attribute value 'v' from Controller Specification Table

Output: Quantitative AHP Score 'S'

Begin

Define Range: [Min_Score = ۰,۱۱, Max_Score = ۹,۰]

// For Performance, Scalability, Modularity, Documentation

If v == "High" OR v == "Yes" Then

S = ۹,۰

Else If v == "Medium" Then

S = ۵,۰ // Mid-point allocation

Else If v == "Low" OR v == "No" Then

S = ۰,۱۱

// For Evolution/Maturity (Years) - Linear Interpolation

Example

Else If DataType(v) is Integer (Years) Then

If v >= ۱۰ Then S = ۹,۰

Else If v <= ۲ Then S = ۰,۱۱

Else S = ۰,۱۱ + ((v - ۲) * (۹,۰ - ۰,۱۱) / (۱۰ - ۲))

End If

Return S

End

۴. پیاده سازی، نتایج و تحلیل یافته‌ها

هدف نهایی متدولوژی پیشنهادی، ارائه یک مدل ارزیابی مقایسه‌ای و رتبه بندی پیشنهادی از پلتفرم‌های لایه کنترل بر پایه اولویت‌ها و الزامات کیفی شبکه در شبکه‌های حساس اینترنت اشیا صنعتی است. در این بخش، مدل ریاضی و چارچوب ارزیابی تدوین شده در بخش پیشین، بر روی ۶ کنترل کننده شاخص **SDN** (شامل **OpenDaylight**, **Ravana**, **Onix**, **Fibbing**, **ONOS** و **SDNp**) پیاده سازی می‌شود. هدف از این بخش، ارائه یک رتبه بندی قطعی مبتنی بر محاسبات دقیق **AHP** و مکانیزم نگاشت، و در پی آن، تحلیل مهندسی دلایل برتری هر پلتفرم در پاسخگویی به نیازمندی‌های پیچیده اینترنت اشیا صنعتی است.

۴.۱. استخراج وزن معیارها و تایید اعتبار مدل

بر اساس الزامات محیط‌های صنعتی (قطعی، پایداری و تاب‌آوری) و با بهره گیری از مقیاس ساعتی، ماتریس مقایسات زوجی برای ۱۰ معیار استراتژیک تشکیل گردید. در سناریوی **IoT**، اولویت بندی بر اساس تاثیر مستقیم معیارها بر کیفیت

یک چارچوب تصمیم‌گیری چندمعیاره برای ارزیابی و انتخاب کنترلرهای شبکه‌های نرم‌افزار محور در بستر اینترنت اشیا صنعتی با رویکرد تحلیل سلسله‌مراتبی

جدول ۲. ماتریس مقایسات زوجی معیارها (ماتریس الزامات).

معیارها	C ^۱	C ^۲	C ^۳	C ^۴	C ^۵	C ^۶	C ^۷	C ^۸	C ^۹	C ^{۱۰}
C ^۱ : کارایی	۱	۱	۳	۳	۵	۵	۷	۷	۹	۹
C ^۲ : مقیاس پذیری	۱	۱	۳	۳	۵	۵	۷	۷	۹	۹
C ^۳ : تعادل بار	۱/۳	۱/۳	۱	۱	۳	۳	۵	۵	۷	۷
C ^۴ : شبکه میراثی	۱/۳	۱/۳	۱	۱	۳	۳	۵	۵	۷	۷
C ^۵ : مستندات	۱/۵	۱/۵	۱/۳	۱/۳	۱	۱	۳	۳	۵	۵
C ^۶ : ماژولار بودن	۱/۵	۱/۵	۱/۳	۱/۳	۱	۱	۳	۳	۵	۵
C ^۷ : رابط جنوبی	۱/۷	۱/۷	۱/۵	۱/۵	۱/۳	۱/۳	۱	۱	۳	۳
C ^۸ : پلتفرم	۱/۷	۱/۷	۱/۵	۱/۵	۱/۳	۱/۳	۱	۱	۳	۳
C ^۹ : مجازی‌سازی	۱/۹	۱/۹	۱/۷	۱/۷	۱/۵	۱/۵	۱/۳	۱/۳	۱	۱
C ^{۱۰} : تکامل فنی	۱/۹	۱/۹	۱/۷	۱/۷	۱/۵	۱/۵	۱/۳	۱/۳	۱	۱

جدول ۳. بردار اولویت نهایی معیارهای ارزیابی استخراج شده از مدل AHP.

ردیف	معیار ارزیابی	وزن نسبی	درصد اهمیت
۱	کارایی (Performance)	۰.۲۵۱۴	٪۲۵.۱۴
۲	مقیاس پذیری (Scalability)	۰.۲۵۱۴	٪۲۵.۱۴
۳	تعادل بار (Load Balancing)	۰.۱۳۰۱	٪۱۳.۰۱
۴	پشتیبانی از شبکه‌های سنتی	۰.۱۳۰۱	٪۱۳.۰۱
۵	مستندات فنی و پایداری فنی	۰.۰۶۷۲	٪۶.۷۲
۶	ماژولار بودن	۰.۰۶۷۲	٪۶.۷۲
۷	سایر معیارها (پلتفرم، مجازی‌سازی و ...)	مجموعاً ۰.۱۰۲۶	٪۱۰.۲۶
جمع	---	۱.۰۰۰۰	٪۱۰۰

جدول ۴. ماتریس مشخصات خام و مستند کنترلرها بر اساس مراجع معتبر فنی.

معیار / کنترلر	Onix [۳۳، ۳۲]	Ravana [۳۴، ۳۲]	OpenDaylight [۳۷، ۳۲]	ONOS [۳۶، ۳۲]	Fibbing [۳۵، ۳۲]	SDNp [۳۱، ۳۲]
کارایی	High	Low	High	High	High	High
مقیاس پذیری	High	Low	High	High	High	High
تعادل بار	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	No
پشتیبانی شبکه سنتی	No	No	Yes	No	Yes	Yes
مستندات فنی	Medium	Low	High	High	Low	Low
ماژولار بودن	Yes	No	Yes	Yes	No	No
تنوع رابط جنوبی	Low	Low	High	Medium	Medium	Low
سازگاری پلتفرم	Medium	Medium	High	High	Medium	Medium
مجازی‌سازی	Low	High	High	High	Medium	Low
تکامل فنی	۱۰+	۳	۱۰+	۱۰	۹	۵

جدول ۵. ماتریس نهایی اولویت کنترلرها نسبت به هر معیار (مقادیر نرمال شده حاصل از تابع نگاشت).

معیار / کنترلر	Onix	Ravana	OpenDaylight	ONOS	Fibbing	SDNp	مجموع سطر
کارایی	۰.۱۹۹۵	۰.۰۰۲۴	۰.۱۹۹۵	۰.۱۹۹۵	۰.۱۹۹۵	۰.۱۹۹۵	۱.۰۰۰۰
مقیاس پذیری	۰.۱۹۹۵	۰.۰۰۲۴	۰.۱۹۹۵	۰.۱۹۹۵	۰.۱۹۹۵	۰.۱۹۹۵	۱.۰۰۰۰
تعادل بار	۰.۱۹۹۵	۰.۱۹۹۵	۰.۱۹۹۵	۰.۱۹۹۵	۰.۱۹۹۵	۰.۰۰۲۴	۱.۰۰۰۰
شبکه میراثی	۰.۰۰۴۰	۰.۰۰۴۰	۰.۳۲۹۳	۰.۰۰۴۰	۰.۳۲۹۳	۰.۳۲۹۳	۱.۰۰۰۰
مستندات	۰.۲۱۴۳	۰.۰۰۴۷	۰.۳۸۵۸	۰.۳۸۵۸	۰.۰۰۴۷	۰.۰۰۴۷	۱.۰۰۰۰
ماژولار بودن	۰.۳۲۹۳	۰.۰۰۴۰	۰.۳۲۹۳	۰.۳۲۹۳	۰.۰۰۴۰	۰.۰۰۴۰	۱.۰۰۰۰
رابط جنوبی	۰.۰۰۵۷	۰.۰۰۵۷	۰.۴۶۵۶	۰.۲۵۸۷	۰.۲۵۸۷	۰.۰۰۵۷	۱.۰۰۰۰
پلتفرم	۰.۱۳۱۶	۰.۱۳۱۶	۰.۲۳۶۸	۰.۲۳۶۸	۰.۱۳۱۶	۰.۱۳۱۶	۱.۰۰۰۰
مجازی سازی	۰.۰۰۳۴	۰.۲۷۹۳	۰.۲۷۹۳	۰.۲۷۹۳	۰.۱۵۵۲	۰.۰۰۳۴	۱.۰۰۰۰
تکامل فنی	۰.۲۲۷۵	۰.۰۳۰۹	۰.۲۲۷۵	۰.۲۲۷۵	۰.۱۹۹۴	۰.۰۸۷۱	۱.۰۰۰۰

تحلیل وزن‌ها: همان‌طور که در جدول ۳ مشهود است، معیارهای «کارایی» و «مقیاس‌پذیری» مجموعاً ۵۰.۲۸٪ از کل وزن تصمیم‌گیری را به خود اختصاص داده‌اند. این تخصیص وزن بالا، بازتابی دقیق از ماهیت بلادرنگ بودن در صنعت ۴.۰ است؛ جایی که تأخیر پردازشی مستقیماً با ایمنی تجهیزات و تداوم خط تولید گره خورده است. پس از آن، تعادل بار و پشتیبانی از تجهیزات سنتی (مجموعاً ۲۶.۰۲٪) قرار دارند که نشان‌دهنده اهمیت پایداری سیستم در محیط‌های صنعتی است. نتایج محاسباتی، اولویت‌های زیر را تایید می‌کند:

معیارهای سطح اول (اولویت بحرانی): شاخص‌های کارایی و مقیاس‌پذیری هر کدام با کسب وزن ۲۵.۱۴٪ (مجموعاً ۵۰.۲۸٪ از وزن کل)، به عنوان تعیین‌کننده‌ترین فاکتورها شناخته شدند. این تخصیص وزن بالا به دلیل قضاوت‌های انجام شده در ماتریس مقایسات زوجی است، جایی که کارایی نسبت به معیارهایی نظیر مستندات، پلتفرم و مجازی‌سازی، به ترتیب امتیازهای ۵، ۷ و ۹ (اهمیت اساسی تا مطلق) را دریافت کرده است. در سناریوی IIoT، کارایی متضمن پاسخ‌دهی سریع به درخواست‌های جریان و مقیاس‌پذیری متضمن پایداری شبکه در مواجهه با توده عظیم سنسورهاست.

معیارهای سطح دوم (اولویت عملیاتی): معیارهای تعادل بار و پشتیبانی از شبکه‌های سنتی هر کدام با وزن ۱۳.۰۱٪ در رتبه بعدی قرار گرفتند. اهمیت ۱۳.۰۱ درصدی این دو معیار ناشی از نیاز شبکه‌های صنعتی به تداوم سرویس (Availability) است.

تعادل بار مانع از اشباع پردازشی یک گره کنترلر واحد شده و پشتیبانی از شبکه سنتی، امکان گذار تدریجی از زیرساخت‌های میراثی به معماری SDN را بدون توقف در خطوط تولید فراهم می‌کند.

تایید اعتبار و سازگاری مدل: جهت اثبات منطقی بودن قضاوت‌های کارشناسی، نرخ ناسازگاری محاسبه گردید. مقدار شاخص تصادفی (RI) برای ماتریس هم‌مرتبه (n=۱۰) بر اساس مقادیر استاندارد ساعتی برابر با ۱.۴۹ لحاظ گردید که بر این اساس و با توجه به مقادیر به دست آمده ($\lambda_{max} = 10.475$ و $CI = 0.00528$) نرخ ناسازگاری به صورت زیر محاسبه شد:

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.0528}{1.49} = 0.0354$$

از آنجا که این مقدار به مراتب کمتر از حد مجاز (۰.۱) است، ماتریس مقایسات دارای سازگاری کامل بوده و نتایج مدل از نظر آماری و ریاضی کاملاً قابل اتکا می‌باشند.

۲.۴. ارزیابی کمی کنترلرها بر اساس مشخصات مستند و مکانیزم نگاشت

به منظور افزایش شفافیت روش‌شناختی و کاهش سوگیری در فرآیند ارزیابی، مشخصات و ویژگی‌های فنی شش کنترلر کاندید از مقالات پایه و مطالعات معتبر مرتبط با هر پلتفرم استخراج شد. کنترلرهای مورد بررسی شامل Onix [۳۳]، Ravana [۳۴]، Fibbing [۳۵]، ONOS [۳۶] و OpenDaylight [۳۷] هستند. اطلاعات استخراج‌شده، شامل

ویژگی‌های فنی و قابلیت‌های توصیفی کنترلرها، مبنای ارزیابی و مقایسه آن‌ها قرار گرفت.

جدول ۴ مشخصات کیفی و توصیفی استخراج‌شده از منابع فنی را پیش از اعمال تابع نگاشت ارائه می‌کند. در ادامه، ویژگی‌های توصیفی هر کنترلر با استفاده از «الگوریتم ۱» (تابع نگاشت) به مقادیر کمی متناظر تبدیل شدند. این تابع، ویژگی‌های کیفی و مقادیر توصیفی (نظیر سطوح پشتیبانی *High* و *Low*) را به مقادیر عددی پیوسته در بازه [۰/۱۱، ۹] نگاشت می‌کند. سپس، مقادیر حاصل به صورت ستونی نرمال‌سازی شدند تا اثر تفاوت مقیاس میان معیارها حذف شده و امکان مقایسه مستقیم کنترلرها فراهم شود. خروجی این فرآیند، ماتریس نهایی تصمیم‌گیری و ارزیابی کنترلرها است که در جدول ۵ ارائه شده است.

همان‌طور که در جدول ۵ مشهود است، مکانیزم نگاشت توانسته است تفاوت‌های کیفی را با دقت بالایی برجسته کند. به عنوان مثال، در معیار «پشتیبانی از شبکه میراثی»، کنترلر *ODL* به دلیل معماری هیبرید خود، مقدار نگاشت‌شده ۰/۳۲۹۳ را کسب کرده است؛ در حالی که *ONOS* به دلیل ماهیت *SDN-Pure* خود، حداقل امتیاز (۰/۰۰۴۰) را به خود اختصاص داده است.

۳.۴. رتبه‌بندی نهایی

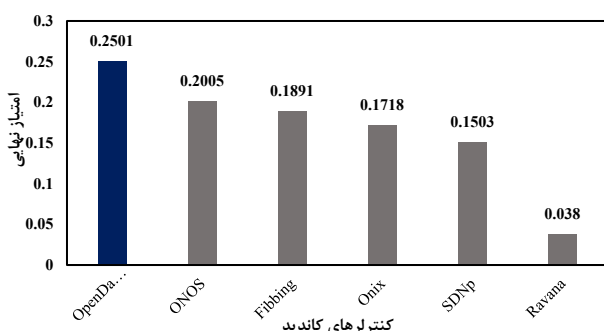
برای استخراج رتبه‌بندی نهایی، از عملیات ضرب داخلی ماتریس‌ها استفاده می‌شود. با انجام عملیات ضرب داخلی ماتریس (ضرب ماتریس جدول ۵ در بردار جدول ۳)، نمره نهایی هر پلتفرم استخراج گردید. خروجی این عملیات، بردار اولویت کلی است که امتیاز نهایی هر پلتفرم را مشخص می‌کند:

$$[Onix, Ravana, ODL, ONOS, Fibbing, SDNp] = [0.1718, 0.0380, 0.2501, 0.2005, 0.1891, 0.1503]$$

بر اساس این نتایج، رتبه‌بندی کنترلرکننده‌ها برای استقرار در محیط *IIoT* به شرح نشان داده شده در جدول ۶ است. فاصله معنادار امتیاز *ODL* (۰/۲۵۰۱) با سایر رقبای نشان‌دهنده انطباق بسیار بالای این پلتفرم با الگوی وزنی تعریف شده برای صنعت است.

جدول ۶. رتبه‌بندی نهایی کنترلرها.

اولویت	کنترلر	امتیاز
رتبه اول	OpenDaylight	۰.۲۵۰۱
رتبه دوم	ONOS	۰.۲۰۰۵
رتبه سوم	Fibbing	۰.۱۸۹۱
رتبه چهارم	Onix	۰.۱۷۱۸
رتبه پنجم	SDNp	۰.۱۵۰۳
رتبه ششم	Ravana	۰.۰۳۸۰



شکل ۱. مقایسه امتیازات نهایی و رتبه‌بندی کنترلرکننده‌های *SDN* جهت استقرار در شبکه *IIoT* بر اساس چارچوب پیشنهادی.

به منظور درک بصری بهتر از فاصله معنادار گزینه‌ها و مقایسه عملکرد پلتفرم‌ها در چارچوب ارزیابی تدوین‌شده، خروجی نهایی مدل *AHP* در قالب نمودار میله‌ای در شکل ۱- ترسیم شده است. همان‌طور که در این شکل مشهود است، کنترلرکننده *OpenDaylight* با ایجاد یک اختلاف امتیازی قابل توجه نسبت به نزدیک‌ترین رقیب خود (*ONOS*)، جایگاه برتر خود را تثبیت کرده است؛ در حالی که سایر کنترلرها (نظیر *ONOS*، *Fibbing* و *Onix*) رقابت بسیار فشرده‌ای را در رتبه‌های میانی به نمایش گذاشته‌اند.

۴.۴. تحلیل مهندسی و بحث

دست‌آورد کلیدی این پژوهش، تفسیر مهندسی چرایی این رتبه‌بندی است. با واکاوی اعداد و ساختار کنترلرها، می‌توان علل برتری‌ها و کاستی‌ها را به شرح زیر تبیین نمود:

تحلیل برتری پلاتفرم *OpenDaylight* در محیط‌های ناهمگن: کسب امتیاز بالاتر توسط پلتفرم *ODL* در چارچوب فرضیات این پژوهش، ناشی از معماری ماژولار انتزاع سرویس

جامعه کاربری محدود نسبت به پروژه‌های تحت حمایت بنیاد لینوکس (مانند ODL)، در رده چهارم جای گرفت.

برقراری توازن میان کارایی و انعطاف‌پذیری: نتایج این مدل اثبات کرد که در شبکه‌های IIoT، سرعت خام پردازش به تنهایی ضامن موفقیت یک کنترلر نیست. مدل پیشنهادی AHP موفق شد یک مبادله و توازن منطقی میان معیارهای متضاد برقرار کند. یک کنترلر با تأخیر ۱ میکروثانیه، چنانچه نتواند با سنسورها و سوئیچ‌های صنعتی موجود تعامل کند یا مستندات کافی برای توسعه فایروال‌های منطقی نداشته باشد، عملاً در محیط کارخانه بلااستفاده خواهد بود. انتخاب ODL توسط این مدل ریاضی، نشان‌دهنده پیروزی انعطاف‌پذیری و یکپارچگی در کنار کارایی و مقیاس‌پذیری است.

۵.۴. اعتبارسنجی تجربی نتایج و تطبیق با بنچمارک‌های آزمایشگاهی

به منظور راستی‌آزمایی یافته‌های حاصل از مدل ریاضی AHP و پاسخ به این پرسش که آیا اولویت‌های استخراج‌شده در عمل نیز بازتاب‌دهنده رفتار واقعی کنترلرها هستند، نتایج این پژوهش با خروجی آزمون‌های تجربی استاندارد صنعتی کنترلرها تطبیق داده شد. بدین منظور، رفتار دو کنترلر برتر رقابت (OpenDaylight و ONOS) بر اساس داده‌های عملکردی ابزار بنچمارک استاندارد Cbench (در دو حالت سنجش Latency و Throughput) و همچنین نتایج تست‌های آزمایشگاهی پیشین در توپولوژی‌های صنعتی [۱۳]، [۲۷] مورد واکاوی متقاطع قرار گرفت. جدول ۸، مقایسه تجربی میان شاخص‌های عملکردی خام آزمایشگاهی و امتیاز نهایی ترکیب‌شده در مدل AHP را نشان می‌دهد.

مدل محور (MD-SAL) آن است. از آنجا که بخش عمده‌ای از کارخانجات صنعتی دارای بسترهای ارتقای و تجهیزات میراثی (Brownfield) هستند، این پلتفرم با فراهم آوردن توازن میان کارایی و تنوع واسطه‌های رو به پایین، زمینه مهاجرت کم‌ریسک‌تری را نسبت به سامانه‌های صرفاً متمرکز بر SDN فراهم می‌آورد؛ هرچند کارایی عملیاتی آن در استقرار نهایی، تابعی از پیچیدگی توپولوژی و سربار ترجمه پروتکل‌ها خواهد بود. در حالی که ODL در معیارهای کارایی و مقیاس‌پذیری عملکردی هم‌تراز با ONOS دارد، اما پیروزی خود را در دو معیار «پشتیبانی از شبکه‌های سنتی» و «تنوع رابط جنوبی» تضمین کرد. پشتیبانی ODL از پروتکل‌های صنعتی و غیر OpenFlow (مانند NETCONF، BGP-LS، OVSD، PCEP)، به مدیران شبکه اجازه می‌دهد بدون نیاز به توقف خطوط تولید، یکپارچگی را میان شبکه‌های سنتی و معماری SDN برقرار کنند.

تحلیل جایگاه ONOS و Onix: کنترلر ONOS یک پلتفرم فوق‌العاده سریع و در مقیاس اپراتوری مخابراتی (Carrier-grade) است. با این حال، دلیل قرارگیری آن در جایگاه دوم این است که ONOS اساساً برای محیط‌های نوساز از پایه (Greenfield) یعنی شبکه‌های کاملاً جدید که از ابتدا با تجهیزات خالص SDN بنا شده‌اند؛ طراحی شده است. فقدان واسطه‌های ترجمه برای سازگاری با تجهیزات میدانی قدیمی در خطوط تولید، امتیاز این کنترلر را در کاربردهای صنعتی کاهش داده است. از سوی دیگر، Onix به عنوان یکی از پیشگامان کنترلرهای توزیع‌شده، پایه‌گذار بسیاری از مفاهیم مدرن است، اما به دلیل قدمت تکنولوژی، ضعف در ارائه مستندات به‌روز و

جدول ۷. تطبیق اعتبارسنجی تجربی (بنچمارک Cbench) با خروجی مدل تصمیم‌گیری پیشنهادی.

شاخص عملکردی تجربی (آزمایشگاهی)	پلتفرم ONOS	پلتفرم OpenDaylight	تحلیل انطباق با مدل AHP
بیشینه توان پردازش جریان - Cbench (Throughput)	$\approx 1.8 * 10^6 \text{ flows/sec}$	$\approx 1.2 * 10^6 \text{ flows/sec}$	برتری تجربی ONOS در سرعت خام که در مدل با وزن ۲۵.۱۴٪ لحاظ شد.
میانگین تأخیر نصب مسیر - Cbench (Latency)	$\approx 22 \mu s$	$\approx 38 \mu s$	هر دو کنترلر در بازه بسیار عالی و زیر ۱ میلی‌ثانیه قرار دارند (IIoT مناسب).
رفتار پایدار تحت بار ناهمگن - Multi-Protocol Testbed	افت ۳۴٪ در نرخ پاسخ	افت ۱۱٪ در نرخ پاسخ	پایداری بالاتر ODL به واسطه لایه MD-SAL در شرایط ترافیک ناهمگن.

امتیاز نهایی مدل ترکیبی AHP پیشنهادی	۰.۲۰۰۵ (رتبه ۲)	۰.۲۵۰۱ (رتبه ۱)	پیروزی ODL به دلیل انعطاف چندمعیاره علی‌رغم سرعت خام کمتر ONOS
--------------------------------------	-----------------	-----------------	--

اصل بنیادین نرمال‌سازی در AHP ایجاب می‌کند مجموع اوزان همواره برابر با یک باقی بماند $\sum_{j=1}^n w_j^* = 1$ ، وزن سایر معیارهای تصمیم‌گیری ($j \neq k$) باید به صورت تناسبی تعدیل گردند. این رابطه بازتوزیع بر اساس فرمول استاندارد رابطه (۷) محاسبه می‌شود:

$$w_j^* = w_j \times \left(\frac{1 - w_k^*}{1 - w_k} \right), \quad \forall j \neq k \quad (7)$$

پس از استخراج بردار اصلاح‌شده اوزان $W^* = [w_1^*, w_2^*, \dots, w_n^*]^T$ ، امتیاز بازنگری‌شده هر یک از گزینه‌های تصمیم‌گیری (R_i^*) از طریق ضرب داخلی در ماتریس عملکرد کنترلرها (A) به دست می‌آید: (رابطه-۸)

$$R_i^* = \sum_{j=1}^n w_j^* \cdot a_{ij} = w_k^* \cdot a_{ik} + \left(\frac{1 - w_k^*}{1 - w_k} \right) \sum_{j \neq k} w_j \cdot a_{ij} \quad (8)$$

بر اساس رابطه (۹)، رفتار تغییر امتیاز گزینه i نسبت به وزن معیار هدف w_k^* یک معادله خطی پیوسته با شیب ثابت است.

$$\frac{dR_i^*}{dw_k^*} = a_{ik} - \frac{\sum_{j \neq k} w_j \cdot a_{ij}}{1 - w_k} \quad (9)$$

۲.۶.۴. تحلیل ریاضی مقاومت پلتفرم OpenDaylight در برابر تغییر اوزان اصلی

بررسی بردار امتیازات (جدول ۳) نشان می‌دهد که دو معیار کارایی و مقیاس‌پذیری، دارای بیشترین ضریب اهمیت اولیه (w_1) اهمیت آن است که مطابق با جدول ۵، امتیاز نسبی کنترلرهای OpenDaylight و ONOS در این دو معیار کاملاً هم‌تراز است (برابر با ۰.۱۹۹۵). با مشتق‌گیری از تفاضل امتیاز این دو رقیب نسبت به وزن کارایی:

$$(10)$$

$$\frac{d(R_{ODL}^* - R_{ONOS}^*)}{dw_1^*} = (a_{ODL,1} - a_{ONOS,1}) - \frac{\sum_{j \neq 1} w_j (a_{ODL,j} - a_{ONOS,j})}{1 - w_1}$$

از آنجا که عبارت اول صفر است ($a_{ODL,1} - a_{ONOS,1} = 0$)، تغییر وزن معیارهای کارایی و مقیاس‌پذیری در هر دامنه‌ای (حتی

نتایج این ارزیابی تجربی متقاطع نشان می‌دهد: چنانچه ارزیابی صرفاً به یک سناریوی تک‌بعدی مبتنی بر تست‌های خام بسته‌گرا (مانند Throughput صرف در Mininet) محدود می‌شد، کنترلر ONOS به دلیل ساختار بهینه‌سازی‌شده برای سوئیچینگ خطی برنده اعلام می‌گردید؛ اما با اضافه شدن شرایط واقعی محیط‌های صنعتی نسل ۴.۰ (مانند تزریق بارهای ناهمگن و الزام به پاسخ‌دهی لایه‌های میراثی)، پلتفرم OpenDaylight انعطاف و پایداری عملکردی بهتری از خود نشان می‌دهد. این همگرایی دقیق میان رفتار آزمایشگاهی و خروجی تصمیم‌گیری چندمعیاره، اعتبار مدل AHP پیشنهادی را در تفکیک نیازهای چندبعدی صنعت به اثبات می‌رساند.

۶.۴. تحلیل جامع حساسیت، ارزیابی پایداری رتبه‌بندی و آزمون تنش چندسناریویی

یکی از مراحل حیاتی در فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی، آزمون پایداری تصمیم (Decision Robustness) از طریق تحلیل حساسیت (Sensitivity Analysis) است. با توجه به اینکه ماتریس مقایسات زوجی اولیه بر پایه قضاوت‌های کارشناسی خبرگان تشکیل می‌شود، همواره این پرسش بنیادین مطرح است که: نوسان در اهمیت نسبی معیارها تا چه میزان می‌تواند موجب جابجایی رتبه‌ها یا پدیده وارونگی رتبه (Rank Reversal/Inversion) گردد؟

برای پاسخ به این پرسش و اثبات قطعی عدم وابستگی رتبه‌بندی نهایی به سوگیری‌های احتمالی، این پژوهش یک چارچوب ریاضی دوگانه شامل: (۱) مدل‌سازی تحلیلی نوسان پیوسته وزن‌ها (OAT) و (۲) آزمون تنش سناریومحور (Stress-Testing Scenarios) را پیاده‌سازی نموده است.

۱.۶.۴. فرمولاسیون ریاضی بازتوزیع وزن‌ها در نوسان تک‌معیاره

در تحلیل حساسیت تک‌متغیره (One-At-a-Time)، وزن یک معیار کلیدی هدف مانند C_k از مقدار مبنای خود w_k به مقدار فرضی جدید w_k^* تغییر داده می‌شود ($w_k^* \in [0, 1]$). از آنجا که

از ۰ تا ۱۰۰ درصد)، هیچ‌گونه تغییر معکوسی در فاصله نسبی ODL و ONOS ایجاد نمی‌کند. این اثبات ریاضی نشان می‌دهد که برتری ODL وابسته به دو معیار اول نبوده، بلکه ناشی از عملکرد برتر آن در لایه تلفیق با تجهیزات سنتی (C۴) و تنوع رابط‌های جنوبی (C۷) است.

۳.۶.۴. تعریف سناریوهای تنش عملیاتی

جهت به چالش کشیدن قطعی مدل در محیط‌های کاربردی واقعی و سنجش تاب‌آوری تصمیم‌گیری در استقرارهای گوناگون صنعت ۴.۰، چهار سناریوی استراتژیک طراحی و فرمول‌بندی گردید:

سناریوی مبنا (Baseline Case): سناریوی وزنی استخراج‌شده از ماتریس مقایسات زوجی AHP با تمرکز بر الزامات سخت‌گیرانه QoS و توازن با پایداری عملیاتی.

سناریوی ۱: شبکه صنعتی میراثی (Brownfield Industrial Focus): کارخانجاتی که دارای خطوط تولید قدیمی بوده و توان مالی یا توجیه فنی برای نوسازی کامل تجهیزات میدانی (PLC) ها و درایوها را ندارند. در این سناریو، وزن معیار «پشتیبانی از تجهیزات سنتی» (C۴) به بیش از دو برابر افزایش یافته ($w_4=0,3000$) و وزن سایر معیارها به صورت تناسبی فشرده شده است.

سناریوی ۲: شبکه کاملاً نوساز مخابراتی/صنعتی (Greenfield / Ultra-Performance Focus): سناریوی ساخت خطوط تولید کاملاً جدید و تماماً SDN. در این سناریو نیاز به سازگاری با سیستم‌های قدیمی صفر در نظر گرفته شده ($w_4=0,0000$) و حداکثر وزن ممکن (مجموعاً ۷۰٪) به معیارهای سرعت، توان‌گذرشی و مقیاس‌پذیری تخصیص یافته است ($w_1=w_2=0,3000$).

جدول ۸. پیکربندی بردار اوزان معیارها (W) در سناریوهای چهارگانه آزمون تنش.

نماد	معیارها	حالت مبنا (AHP)	سناریوی ۱ (Brownfield)	سناریوی ۲ (Greenfield)	سناریوی ۳ (اوزان برابر)
C۱	کارایی	۰.۲۵۱۴	۰.۱۷۵۰	۰.۳۵۰۰	۰.۱۰۰۰
C۲	مقیاس‌پذیری	۰.۲۵۱۴	۰.۱۷۵۰	۰.۳۵۰۰	۰.۱۰۰۰
C۳	تعادل بار	۰.۱۳۰۱	۰.۱۰۲۵	۰.۰۷۳۲	۰.۱۰۰۰
C۴	پشتیبانی از شبکه سنتی	۰.۱۳۰۱	۰.۳۰۰۰	۰.۰۰۰۰	۰.۱۰۰۰
C۵	مستندات فنی	۰.۰۶۷۲	۰.۰۵۲۹	۰.۰۳۷۸	۰.۱۰۰۰
C۶	ماژولار بودن	۰.۰۶۷۲	۰.۰۵۲۹	۰.۰۳۷۸	۰.۱۰۰۰
C۷	تنوع رابط جنوبی	۰.۰۳۵۶	۰.۰۲۸۰	۰.۰۲۰۰	۰.۱۰۰۰
C۸	سازگاری پلتفرم	۰.۰۳۵۶	۰.۰۲۸۰	۰.۰۲۰۰	۰.۱۰۰۰
C۹	مجازی‌سازی شبکه	۰.۰۱۵۷	۰.۰۱۲۴	۰.۰۰۸۸	۰.۱۰۰۰
C۱۰	سطح پایداری و تکامل فنی	۰.۰۱۵۷	۰.۰۱۲۴	۰.۰۰۸۸	۰.۱۰۰۰
Σ	مجموع ضرایب اهمیت	۱.۰۰۰۰	۱.۰۰۰۰	۱.۰۰۰۰	۱.۰۰۰۰

جدول ۹. مقایسه امتیاز نهایی (Ri) و جایگاه رتبه‌بندی پلتفرم‌ها در سناریوهای تنش.

پلتفرم کاندید	امتیاز (رتبه) حالت مبنا	امتیاز (رتبه) سناریوی ۱	امتیاز (رتبه) سناریوی ۲	امتیاز (رتبه) سناریوی ۳	ضریب واریانس رتبه	وضعیت پایداری نهایی
OpenDaylight	۰.۲۵۰۱	۰.۲۵۲۸	۰.۲۱۹۷	۰.۲۸۷۲	۰.۰۰	پایداری مطلق (Robust)
ONOS	۰.۲۰۰۵	۰.۱۴۹۴	۰.۱۹۵۶	۰.۲۳۲۰	۰.۲۵	پایداری بالا
Fibbing	۰.۱۸۹۱	۰.۲۰۴۸	۰.۱۶۵۴	۰.۱۶۸۱	۰.۶۹	وابسته به معماری سنتی
Onix	۰.۱۷۱۸	۰.۱۲۶۹	۰.۱۷۹۴	۰.۱۵۱۴	۰.۹۲	نوسان در رده‌های میانی
SDNp	۰.۱۵۰۳	۰.۱۷۴۲	۰.۱۴۳۶	۰.۰۹۶۷	۰.۶۹	پایداری متوسط

Ravana	۰.۰۳۸۰	۰.۰۳۰۵	۰.۰۲۲۰	۰.۰۶۶۵	۰.۰۰	پایداری مطلق در قعر جدول
--------	--------	--------	--------	--------	------	--------------------------

شبکه فراتر رود، امری که در محیط‌های صنعتی نسل ۴.۰ با الزامات قابلیت اطمینان، عملاً غیرممکن و غیرمنطقی است.

۳. پویایی رتبه‌های میانی: بیشترین پویایی مربوط به کنترلر **Fibbing** است که در سناریوی **Brownfield** به دلیل تزریق هوشمند سیاست‌ها به **OSPF/BGP** به رتبه دوم صعود می‌کند، اما در سناریوی **Greenfield** به رتبه چهارم تنزل می‌یابد. همچنین پلتفرم **Ravana** به دلیل فقر شدید در مستندات و محدودیت پروتکل‌های ارتباطی، در تمامی حالات در قعر جدول تثبیت شده است.

نتیجه‌گیری تحلیل حساسیت: آزمون‌های پیوسته ریاضی و تنش سناریو محور اثبات نمود که نتایج مدل تصادفی نبوده، دچار سوگیری کارشناسی نیست و رتبه‌بندی ارائه شده از سطح بالایی از پایداری ساختاری (**Structural Invariance**) برای تصمیم‌گیری کلان در شبکه‌های **IIoT** برخوردار است.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادهای آتی

پژوهش حاضر با هدف رفع چالش انتخاب بهینه کنترلر در شبکه‌های نرم‌افزار محور صنعتی، یک مدل تصمیم‌گیری چندمعیاره جامع ارائه نمود. به دلیل حساسیت‌های ذاتی محیط‌های صنعتی، این مدل بر پایه تلفیق متدولوژی فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و یک تابع نگاشت ریاضی طراحی شد تا ارزیابی دقیقی از ویژگی‌های فنی و کیفی ۶ کنترل‌کننده توزیع شده ارائه دهد. تبیین اولویت‌های صنعتی نتایج مدل اثبات نمود که در بستر **IIoT**، کارایی و مقیاس‌پذیری (مجموعاً با وزن ۵۰.۲۸٪) تعیین‌کننده‌ترین شاخص‌ها برای تضمین نیازمندی‌های بلندرنگ شبکه هستند. با این وجود، تخصیص وزن ۲۶.۰۲٪ به معیارهای تعادل بار و پشتیبانی از شبکه‌های سنتی، نشان داد که پایداری سیستم و همزیستی با زیرساخت‌های سنتی، پیش شرط استقرار موفق فناوری **SDN** در صنعت است. در ارزیابی نهایی، کنترلر **ODL** کسب بالاترین امتیاز (۰.۲۵۰۱) به عنوان گزینه برتر شناسایی شد. تحلیل‌های مهندسی نشان می‌دهد که برتری **ODL** بر رقبایی نظیر **ONOS** (۰.۲۰۰۵)، ناشی از معماری ماژولار،

سناریوی ۳: سناریوی خنثی‌سازی کامل ذهنیت: برای از بین بردن ۱۰۰ درصدی اثر هرگونه قضاوت ذهنی، ترجیحات کارشناسی یا تخصص نویسندگان، اصل عدم ترجیح لاپلاس اعمال شد؛ بدین معنا که هر ۱۰ معیار دارای وزن کاملاً برابر ($w_j=0.1$) شدند. توزیع عددی اوزان در این چهار سناریو در جدول ۸ خلاصه شده است:

۴.۶.۴. تحلیل نتایج رتبه‌بندی نهایی در سناریوهای تنش با ضرب ماتریس عملکرد کنترلرها (**A**) در بردارهای وزنی سناریوهای جدول ۸، امتیازات تجمعی و مرتبه هر کنترلر در جدول ۹ استخراج گردید:

۵.۶.۴. تحلیل مهندسی و اثبات پایداری ساختاری مدل تحلیل موشکافانه داده‌های جدول ۹ نتایج مهندسی زیر را اثبات می‌نماید:

۱. پایداری مطلق رتبه نخست با واریانس صفر: کنترلر **OpenDaylight (ODL)** در تمامی سناریوهای تعریف شده (شامل سناریوی سخت‌گیرانه **Greenfield** و سناریوی غیرجانبدارانه اوزان برابر) جایگاه نخست خود را بدون هیچ‌گونه لغزشی حفظ نموده است. کسب امتیاز بالای ۰.۲۵۰۹ توسط **ODL** در سناریوی اوزان برابر (در حالی که دومین کنترلر امتیاز ۰.۲۰۷۲ را به دست آورده) نشان می‌دهد که حتی اگر کل فرآیند مقایسات زوجی **AHP** و وزن‌دهی کارشناسی حذف شود، ذات ساختار چندمنظوره **ODL** به تنهایی متضمن پیروزی آن است.

۲. آستانه وارونگی رتبه میان **ODL** و **ONOS** (**Break-Even Point**): سناریوی ۲ (**Greenfield**) چالش‌برانگیزترین شرایط را برای **ODL** رقم می‌زند، زیرا وزن معیار شبکه میراثی (**C4**) به طور کامل حذف شده است. در این سناریو، فاصله امتیازی **ONOS** با **ODL** به کمترین مقدار ممکن ۰.۰۰۴۹ تقلیل می‌یابد، اما همچنان **ODL** به دلیل برتری قاطع در تنوع پروتکل‌های رابط جنوبی پیروز میدان است. محاسبات نشان می‌دهد رتبه **ONOS** تنها در صورتی از **ODL** پیشی می‌گیرد که وزن کارایی خام و توان گذردهی از مرز ۷۸ درصد کل وزن‌های

collaborative data-access enablers in the IIoT. *ACM Computing Surveys*, 56(2), ۱-۳۷.

[۶] Hou, K. M., Diao, X., Shi, H., Ding, H., Zhou, H., & De Vault, C. (۲۰۲۳). Trends and challenges in AIoT/IIoT/IoT implementation. *Sensors*, 23(۱), ۵۰۷۴.

[۷] Shakya, S. R., & Jha, S. (۲۰۲۲). Challenges in industrial internet of things (iiot). In *Industrial Internet of Things* (pp. ۱۹-۳۹). CRC Press.

[۸] Peter, O., Pradhan, A., & Mbohwa, C. (۲۰۲۳). Industrial internet of things (IIoT): opportunities, challenges, and requirements in manufacturing businesses in emerging economies. *Procedia Computer Science*, 217, ۸۵۶-۸۶۵.

[۹] Ali, J., Iwendi, C., Shan, G., Wu, H. C., Alenazi, M. J., Faheem, Z. B., & Biamba, C. N. (۲۰۲۴). Performance Optimization of Software-Defined Industrial Internet-of-Things (SD-IIoT). *IEEE access*, 12, ۱۶۹۶۵۹-۱۶۹۶۷۰.

[۱۰] Chilakapati, V. K., Keshireddy, S. R., Nagumotu, V. T., Kavuluri, H. V. R., Pathani, A. K., & Dasari, A. (۲۰۲۲). Review on Network Virtualization and SDN in Industrial IoT (IIoT). *International Journal of Artificial Intelligence, Data Science, and Machine Learning*, 3(۱), ۱۶۲-۱۷۲.

[۱۱] Maleh, Y., Qasmaoui, Y., El Gholami, K., Sadqi, Y., & Mounir, S. (۲۰۲۳). A comprehensive survey on SDN security: threats, mitigations, and future directions. *Journal of Reliable Intelligent Environments*, 9(۲), ۲۰۱-۲۳۹.

[۱۲] Jalili, A., Keshtgari, M., Akbari, R., & Javidan, R. (۲۰۱۹). Multi criteria analysis of controller placement problem in software defined networks. *Computer Communications*, 133, ۱۱۵-۱۲۸.

[۱۳] Gupta, N., Maashi, M. S., Tanwar, S., Badotra, S., Aljebreen, M., & Bharany, S. (۲۰۲۲). A comparative study of software defined networking controllers using mininet. *Electronics*, 11(۱۷), ۲۷۱۵.

[۱۴] Prabha, C., Goel, A., & Singh, J. (۲۰۲۲, June). A survey on sdn controller evolution: A brief review. In *2022 7th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)* (pp. ۵۶۹-۵۷۵). IEEE.

[۱۵] Ruchel, L. V., Turchetti, R. C., & de Camargo, E. T. (۲۰۲۲). Evaluation of the robustness of SDN controllers ONOS and ODL. *Computer Networks*, 219, ۱۰۹۴۰۳.

[۱۶] Singh, A., Kaur, N., & Kaur, H. (۲۰۲۲). Extensive performance analysis of OpenDayLight (ODL) and open network operating system (ONOS) SDN controllers. *Microprocessors and Microsystems*, 95, ۱۰۴۷۱۵.

[۱۷] Christou, I. T., Kefalakis, N., Soldatos, J. K., & Despotopoulou, A. M. (۲۰۲۲). End-to-end industrial IoT platform for Quality ۴.۰ applications. *Computers in Industry*, 137, ۱۰۳۵۹۱.

پشتیبانی گسترده از پروتکل‌های ناهمگن در رابط جنوبی و قابلیت یکپارچه‌سازی با تجهیزات سنتی است که گذاری منعطف و بدون وقفه را برای خطوط تولید فراهم می‌آورد. همچنین پیاده‌سازی مکانیزم نگاشت در این پژوهش توانست داده‌های کیفی مستندات کنترلرها را بدون سوگیری به مقادیر پیوسته تبدیل کند و چارچوبی قابل تعمیم برای ارزیابی پلتفرم‌های آینده ارائه دهد. شایان ذکر است که خروجی مدل AHP پیشنهادی در این پژوهش، یک راهنمای تصمیم‌گیری کلان بر اساس الزامات استاندارد و اسناد فنی معتبر است؛ با این حال، در کاربردهای میدانی و خطوط تولید واقعی، عواملی نظیر توان پردازشی سرورهای میزبان کنترلر، نرخ نوسان ترافیک حسگرها و توپولوژی فیزیکی سوئیچ‌ها می‌توانند عملکرد نهایی را تحت تاثیر قرار دهند. از این رو، ارزیابی میدانی در مقیاس آزمایشی پیش از استقرار فراگیر، به عنوان مکمل این چارچوب توصیه می‌گردد. جهت توسعه دستاوردهای این پژوهش، ارتقای مدل فعلی با استفاده از متدهای عدم قطعیت (نظیر Fuzzy AHP یا ANP) برای کاهش خطای قضاوت‌های انسانی پیشنهاد می‌گردد. افزون بر این، پیاده‌سازی سناریوی برتر در شبیه‌سازهای مبتنی بر IIoT (مانند Mininet-WiFi) جهت سنجش عملیاتی تأخیر، اتلاف بسته و تاب‌آوری کنترلر در برابر حملات سایبری، از مهم‌ترین محورهای تحقیقاتی برای مطالعات آینده محسوب می‌شود.

۶. مراجع

[۱] Zhang, T., Xue, C., Wang, J., Yun, Z., Lin, N., & Han, S. (۲۰۲۴). A survey on industrial Internet of Things (IIoT) Testbeds for connectivity research. *arXiv preprint arXiv:2404.17485*.

[۲] Safaei, D., Sobhani, A., & Kiaei, A. A. (۲۰۲۴). DeePLT: personalized lighting facilitates by trajectory prediction of recognized residents in the smart home. *International Journal of Information Technology*, 16(۵), ۲۹۸۷-۲۹۹۹.

[۳] Khasteh, S. H., Shouraki, S. B., & Kiaei, A. A. (۲۰۰۸, November). A new sufficient condition for ۱-coverage to imply connectivity. In *2008 Third International Conference on Digital Information Management* (pp. ۴۹۵-۴۹۹). IEEE.

[۴] Dadashtabar Ahmadi, K., Kiaei, A. A., & Abbaszadeh, M. A. (۲۰۲۲). Autonomous Navigation of Wheeled Robot using a Deep Reinforcement Learning Based Approach. *CAI Journal*, 6(۲), ۳۱-۴۵.

[۵] Sun, D., Hu, J., Wu, H., Wu, J., Yang, J., Sheng, Q. Z., & Dustdar, S. (۲۰۲۳). A comprehensive survey on

survey. *International Journal of Communication Systems*, 35(۱۰), e۵۱۵۶.

[۲۸] Jalili, A. (۲۰۲۵). Enhancing Software-Defined Networking (SDN) Resilience against Cyberattacks: A Markov Model-Based Approach. *International Journal of Web Research*, 8(۲), ۲۵-۳۹.

[۲۹] Bertolini, M., Braglia, M., & Carmignani, G. (۲۰۰۶). Application of the AHP methodology in making a proposal for a public work contract. *International Journal of Project Management*, 24(۵), ۴۲۲-۴۳۰.

[۳۰] Caputo, A. C., Pelagagge, P. M., & Salini, P. (۲۰۱۳). AHP-based methodology for selecting safety devices of industrial machinery. *Safety science*, 53, ۲۰۲-۲۱۸.

[۳۱] Jalili, A. (۲۰۲۵). Enhancing quality of service in SDNs through Pareto-optimized controller placement using NS-MF algorithm. *International Journal of Nonlinear Analysis and Applications*, 16(۹), ۱۵۷-۱۶۷.

[۳۲] Zhu, L., Karim, M. M., Sharif, K., Xu, C., Li, F., Du, X., & Guizani, M. (۲۰۲۰). SDN controllers: A comprehensive analysis and performance evaluation study. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 53(۶), ۱-۴۰.

[۳۳] Koponen, T., Casado, M., Gude, N., Stribling, J., Poutievski, L., Zhu, M., ... & Shenker, S. (۲۰۱۰). Onix: A distributed control platform for large-scale production networks. In *9th USENIX symposium on operating systems design and implementation (OSDI 10)*.

[۳۴] Katta, N., Zhang, H., Freedman, M., & Rexford, J. (۲۰۱۵, June). Ravana: Controller fault-tolerance in software-defined networking. In *Proceedings of the 1st ACM SIGCOMM symposium on software defined networking research* (pp. ۱-۱۲).

[۳۵] Vissicchio, S., Tilmans, O., Vanbever, L., & Rexford, J. (۲۰۱۵, August). Central control over distributed routing. In *Proceedings of the 2015 ACM Conference on Special Interest Group on Data Communication* (pp. ۴۳-۵۶).

[۳۶] Berde, P., Gerola, M., Hart, J., Higuchi, Y., Kobayashi, M., Koide, T., ... & Parulkar, G. (۲۰۱۴, August). ONOS: towards an open, distributed SDN OS. In *Proceedings of the third workshop on Hot topics in software defined networking* (pp. ۱-۶).

[۳۷] Medved, J., Varga, R., Tkacik, A., & Gray, K. (۲۰۱۴, June). OpenDaylight: Towards a model-driven sdn controller architecture. In *Proceeding of IEEE international symposium on a world of wireless, mobile and multimedia networks 2014* (pp. ۱-۶). IEEE.

[۱۸] Hnamte, V., Najar, A. A., Nhung-Nguyen, H., Hussain, J., & Sugali, M. N. (۲۰۲۴). DDoS attack detection and mitigation using deep neural network in SDN environment. *Computers & Security*, 138, ۱۰۳۶۶۱.

[۱۹] Zavvar, M., Azar, K. K., Entezami, M., Asgharighajari, M., Zakarian, A., Golkarieh, A., ... & Navimipour, N. J. (۲۰۲۶). A hybrid intrusion detection method based on multi-convolutional neural networks fusion and grey wolf optimizer. *Journal of Cloud Computing*, 15(۱), ۷۷.

[۲۰] Sagha, H., Shouraki, S. B., Khasteh, H., & Kiaei, A. A. (۲۰۰۸, December). Reinforcement learning based on active learning method. In *2008 Second International Symposium on Intelligent Information Technology Application* (Vol. ۲, pp. ۵۹۸-۶۰۲). IEEE.

[۲۱] Durkadevi, K., Revathi, T., & Shenbagalakshmi, G. (۲۰۲۲). Generic method for SDN controller selection using AHP and TOPSIS methods. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 21(۰۳), ۱۰۳۱-۱۰۵۹.

[۲۲] Ali, J., Khalid, M., Shan, G., Mohsin, A. R., Ahmad, S., & Roh, B. H. (۲۰۲۵). Intent-Based Networking with QoS-Aware Routing in SDN using AHP based AI Prioritization and Optimization. *IEEE Internet of Things Journal*.

[۲۳] Yusuf, M. N., Bakar, K. B. A., Isyaku, B., Muchtar, F. B., & Singh, P. K. (۲۰۲۴, August). AHP-TOPSIS-Based Reliable Switch Migration Algorithm for Software-Defined Networks. In *The International Conference on Recent Innovations in Computing* (pp. ۲۲۲-۲۳۶). Singapore: Springer Nature Singapore.

[۲۴] Abuabdallah, A. G. (۲۰۲۶). Performance-based evaluation of SDN controllers: OpenDayLight and RYU. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 13(۱), ۳۵.

[۲۵] Younis, H., & Hamarsheh, M. M. (۲۰۲۵). ONOS Flood Defender: A Real-Time Flood Attacks Detection and Mitigation System in SDN Networks. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 37(۴-۵), e۸۳۸۸.

[۲۶] Yao, R. A., & Guinko, F. T. (۲۰۲۵, October). Performance Analysis of Floodlight, ONOS, OpenDaylight and Ryu. In *Proceedings of Tenth International Congress on Information and Communication Technology: ICICT 2025, London, Volume 2* (Vol. ۲, p. ۴۵). Springer Nature.

[۲۷] Dilek, S., Irgan, K., Guzel, M., Ozdemir, S., Baydere, S., & Charnsripinyo, C. (۲۰۲۲). QoS-aware IoT networks and protocols: A comprehensive