*فصلنامه علمی - پژوهشی فرماندهی و کنترل، سال دهم، شماره سه، پاییز ۱۴۰۵*

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

*احمد جلیلی*[1*]

**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 تجمیع 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 ٤ سناریوی تنش عملیاتی (شامل محیط‌های میراثی، تمام **SDN** و اوزان برابر) پایداری قطعی این رتبه‌بندی را با واریانس صفر **σ=۰،۰۰** 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.

[1] نویسنده مسئول، استادیار و عضو هیات علمی گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه گنبدکاووس، گلستان، ایران jalili@gonbad.ac.ir

[ Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-23 ]

## 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 ٤.٠ یاد می‌شود. هسته مرکزی این تحول، ادغام سیستم‌های فیزیکی با زیرساخت‌های دیجیتال است که منجر به پیدایش مفهوم «اینترنت اشیای 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 زمانِ 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 کنترلی 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**) از الزامات اساسی کیفیت سرویس(**QoS**) محسوب می‌شوند [٤]. ازاین‌رو، شبکه صنعتی باید بتواند ترافیک‌های با اولویت‌های مختلف را به‌صورت 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] [٦].

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 توزیع‌شده 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 ٤.٠، 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





[ Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-23 ]

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**، **ONOS**، **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 ٦ 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 کاندیداها، معیارهای ده‌گانه ارزیابی، چارچوب ریاضی فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی و مکانیزم نوین نگاشت داده‌ها تبیین می‌گردند. در بخش ٤، مدل طراحی‌شده پیاده‌سازی می‌گردد و پس از استخراج اوزان و اعمال تابع نگاشت بر روی ٦ 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.





[ Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-23 ]

## 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 فرابتکاری، 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 نوپا بودن فناوری در آن سال، بسیاری از کنترلرهای قدرتمند امروزی (نظیر **ONOS**) و الزامات خاص صنعت ۴.۰ در مدل آن‌ها لحاظ نشده بود.





[ Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-23 ]

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 [۲٤]. 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 [۲٦]. 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 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 ٤.۰ 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 ٤.۰ 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 دومرحله‌ایِ 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 ماموریت‌حیاتی (**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





[ Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-23 ]

پرکاربردی 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، ٦ 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 ٤.٠ 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.

٤. **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.

٦. **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 ریاضیAHP





[ Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-23 ]

فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی در این پژوهش به عنوان موتور استنتاجی جهت حل مسئله تصمیم‌گیری چندمعیاره به‌کار 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=۵**) 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 ۱=اهمیت یکسان و ۹=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:

$$a_{ij} = \left(\prod_{k=1}^{m} a_{ij}^{(k)}\right)^{\frac{1}{m}} \qquad (۱)$$

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 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=۰،۰۳۵٤**) موید همگرایی و انطباق بالای نظرات اعضای پنل است.

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

**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 | ۸ ،۶ ،۴ ،۲ |

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))

$$C_j = \sum_{i=1}^{n} a_{ij} \qquad (۲)$$

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.





[ Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-23 ]

**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))

$$W_i = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{a_{ij}}{C_j} \qquad (۳)$$

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 $\lambda max$:** 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، $\lambda max$ محاسبه می‌شود (رابطه-(٤)):

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{(AW)_i}{W_i} \qquad (٤)$$

**ب) شاخص سازگاری (CI):** این شاخص میزان انحراف مقادیر ماتریس از حالت کاملاً سازگار (جایی که $\lambda max=n$) را نشان می‌دهد (رابطه-(٥)):

$$CI = \frac{\lambda_{max}-n}{n-1} \qquad (٥)$$

**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-(٦) محاسبه می‌شود:

$$CR = \frac{CI}{RI} \qquad (٦)$$

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

## ٤.۳. طراحی مکانیزم نگاشت نوین برای ویژگی های 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: $f(xmin)$=۰،۱۱ (بیانگر عدم وجود ویژگی یا عملکرد بسیار ضعیف)
- حداکثر امتیاز: $f(xmax)$=۹،۰ (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: $\forall x<x_0 \Rightarrow f(x)$=۰،۱۱
- اگر ویژگی فراتر از سطح مطلوب (بالاتر از ماکزیمم) باشد: $\forall x>x_n \Rightarrow f(x)$=۹،۰

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





[ Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-23 ]

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 استخراج‌شده از **AHP** را خواهد داشت.

```
Algorithm ۱:// 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
```

## ٤. پیاده‌سازی، نتایج و تحلیل یافته‌ها

هدف نهایی متدولوژی پیشنهادی، ارائه یک مدل ارزیابی مقایسه‌ای و رتبه‌بندی پیشنهادی از پلتفرم‌های لایه کنترل بر پایه اولویت‌ها و الزامات کیفی شبکه در شبکه‌های حساس اینترنت اشیای صنعتی است. در این بخش، مدل ریاضی و چارچوب ارزیابی تدوین شده در بخش پیشین، بر روی ٦ کنترل‌کننده شاخص **SDN** (شامل **Onix**، **Ravana**، **OpenDaylight**، **ONOS**، **Fibbing** و **SDNp**) پیاده‌سازی می‌شود. هدف از این بخش، ارائه یک رتبه‌بندی 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 اشیای صنعتی است.

### ٤.١. استخراج وزن معیارها و تایید اعتبار مدل

بر اساس الزامات محیط‌های صنعتی (قطعیت، پایداری و تاب‌آوری) و با بهره‌گیری از مقیاس ساعتی، ماتریس مقایسات زوجی برای ۱۰ معیار استراتژیک تشکیل گردید. در سناریوی **IIoT**، اولویت‌بندی بر اساس تاثیر مستقیم معیارها بر کیفیت سرویس انجام شده است. منطق استخراج مقادیر در ماتریس مقایسات زوجی به شرح زیر است:

- **اولویت مطلق کارایی و مقیاس‌پذیری:** با توجه به ماهیت بلادرنگ شبکه‌های صنعتی، معیار کارایی نسبت به معیارهای مجازی‌سازی 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 مقیاس‌پذیری:** 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 استدلال های صورت گرفته، و اهمیت و اولویت معیارها در کیفیت سرویس شبکه، جدول ۲ ماتریس مقایسات زوجی معیارها را نشان می دهد.

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 وزن ها) قرار گرفته است. غلبه اعداد بزرگ (۷ و ۹) در سطرهای اول و دوم، نشان‌دهنده تمرکز شدید مدل بر پارامترهای فنی کلیدی در حوزه **IIoT** است.

با اعمال روابط ریاضیِ نرمال‌سازی ستونی و میانگین‌گیری سطری بر روی ماتریس 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 ٤.٠ است. این توزیع وزنی مستدل، مبنای محاسباتی مرحله بعد (ارزیابی نهایی کنترلرها) را تشکیل می‌دهد.





[ Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-23 ]

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

| معیارها | C۱ | C۲ | C۳ | C٤ | C٥ | C٦ | C۷ | C۸ | C۹ | C۱۰ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C۱: کارایی | ۱ | ۱ | ۳ | ۳ | ٥ | ٥ | ۷ | ۷ | ۹ | ۹ |
| C۲: مقیاس‌پذیری | ۱ | ۱ | ۳ | ۳ | ٥ | ٥ | ۷ | ۷ | ۹ | ۹ |
| C۳: تعادل بار | ۱/۳ | ۱/۳ | ۱ | ۱ | ۳ | ۳ | ٥ | ٥ | ۷ | ۷ |
| C٤: شبکه میراثی | ۱/۳ | ۱/۳ | ۱ | ۱ | ۳ | ۳ | ٥ | ٥ | ۷ | ۷ |
| C٥: مستندات | ۱/٥ | ۱/٥ | ۱/۳ | ۱/۳ | ۱ | ۱ | ۳ | ۳ | ٥ | ٥ |
| C٦: ماژولار بودن | ۱/٥ | ۱/٥ | ۱/۳ | ۱/۳ | ۱ | ۱ | ۳ | ۳ | ٥ | ٥ |
| C۷: رابط جنوبی | ۱/۷ | ۱/۷ | ۱/٥ | ۱/٥ | ۱/۳ | ۱/۳ | ۱ | ۱ | ۳ | ۳ |
| C۸: پلتفرم | ۱/۷ | ۱/۷ | ۱/٥ | ۱/٥ | ۱/۳ | ۱/۳ | ۱ | ۱ | ۳ | ۳ |
| C۹: مجازی‌سازی | ۱/۹ | ۱/۹ | ۱/۷ | ۱/۷ | ۱/٥ | ۱/٥ | ۱/۳ | ۱/۳ | ۱ | ۱ |
| C۱۰: تکامل فنی | ۱/۹ | ۱/۹ | ۱/۷ | ۱/۷ | ۱/٥ | ۱/٥ | 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) | ۰.۲٥۱٤ | ٪۲٥.۱٤ |
| ۲ | مقیاس‌پذیری (Scalability) | ۰.۲٥۱٤ | ٪۲٥.۱٤ |
| ۳ | تعادل بار (Load Balancing) | ۰.۱۳۰۱ | ٪۱۳.۰۱ |
| ٤ | پشتیبانی از شبکه‌های سنتی | ۰.۱۳۰۱ | ٪۱۳.۰۱ |
| ٥ | مستندات فنی و پایداری فنی | ۰.۰٦۷۲ | ٪٦.۷۲ |
| ٦ | ماژولار بودن | ۰.۰٦۷۲ | ٪٦.۷۲ |
| ۷ | سایر معیارها (پلتفرم، مجازی‌سازی و ...) | مجموعاً ۰.۱۰۲٦ | ٪۱۰.۲٦ |
| جمع | --- | ۱.۰۰۰۰ | ٪۱۰۰ |

جدول ٤. ماتریس مشخصات خام و مستند کنترلرها بر اساس مراجع معتبر فنی.

| معیار / کنترلر | Onix [۳۳، ۳۲] | Ravana [۳٤، ۳۲] | OpenDaylight [۳۷، ۳۲] | ONOS [۳٦، ۳۲] | Fibbing [۳٥، ۳۲] | SDNp [۳۱، ۳۲] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| کارایی | High | Low | High | High | High | High |
| مقیاس‌پذیری | 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 | ٥ |





[ Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-23 ]

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

| معیار / کنترلر | Onix | Ravana | OpenDaylight | ONOS | Fibbing | SDNp | مجموع سطر |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| کارایی | ۰.۱۹۹۵ | ۰.۰۰۲٤ | ۰.۱۹۹۵ | ۰.۱۹۹۵ | ۰.۱۹۹۵ | ۰.۱۹۹۵ | ۱.۰۰۰۰ |
| مقیاس‌پذیری | ۰.۱۹۹۵ | ۰.۰۰۲٤ | ۰.۱۹۹۵ | ۰.۱۹۹۵ | ۰.۱۹۹۵ | ۰.۱۹۹۵ | ۱.۰۰۰۰ |
| تعادل بار | ۰.۱۹۹۵ | ۰.۱۹۹۵ | ۰.۱۹۹۵ | ۰.۱۹۹۵ | ۰.۱۹۹۵ | ۰.۰۰۲٤ | ۱.۰۰۰۰ |
| شبکه میراثی | ۰.۰۰٤۰ | ۰.۰۰٤۰ | ۰.۳۲۹۳ | ۰.۰۰٤۰ | ۰.۳۲۹۳ | ۰.۳۲۹۳ | ۱.۰۰۰۰ |
| مستندات | ۰.۲۱٤۳ | ۰.۰۰٤۷ | ۰.۳۸۵۸ | ۰.۳۸۵۸ | ۰.۰۰٤۷ | ۰.۰۰٤۷ | ۱.۰۰۰۰ |
| ماژولار بودن | ۰.۳۲۹۳ | ۰.۰۰٤۰ | ۰.۳۲۹۳ | ۰.۳۲۹۳ | ۰.۰۰٤۰ | ۰.۰۰٤۰ | ۱.۰۰۰۰ |
| رابط جنوبی | ۰.۰۰۵۷ | ۰.۰۰۵۷ | ۰.٤٦٥٦ | ۰.۲۵۸۷ | ۰.۲۵۸۷ | ۰.۰۰۵۷ | ۱.۰۰۰۰ |
| پلتفرم | ۰.۱۳۱٦ | ۰.۱۳۱٦ | ۰.۲۳٦۸ | ۰.۲۳٦۸ | ۰.۱۳۱٦ | ۰.۱۳۱٦ | ۱.۰۰۰۰ |
| مجازی‌سازی | ۰.۰۰۳٤ | ۰.۲۷۹۳ | ۰.۲۷۹۳ | ۰.۲۷۹۳ | ۰.۱۵۵۲ | ۰.۰۰۳٤ | ۱.۰۰۰۰ |
| تکامل فنی | ۰.۲۲۷۵ | ۰.۰۳۰۹ | ۰.۲۲۷۵ | ۰.۲۲۷۵ | ۰.۱۹۹٤ | ۰.۰۸۷۱ | ۱.۰۰۰۰ |

**تحلیل وزن‌ها:** همان‌طور که در جدول۳ 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 ٤.۰ 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 ٪۲٦.۰۲) 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 هرکدام با کسب وزن ٪۲۵.۱٤ (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 **۱.٤۹** لحاظ گردید که بر این اساس و با توجه به مقادیر به دست آمده ($\boldsymbol{\lambda_{max} = 10.475}$ و **CI = ۰،۰۵۲۸**) 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.

## ۲.٤. ارزیابی کمی کنترلرها بر اساس مشخصات مستند و مکانیزم نگاشت

به‌منظور 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** [۳٤]، **Fibbing** [۳۵]، **ONOS** [۳٦] و **OpenDaylight** [۳۷] هستند. اطلاعات استخراج‌شده، شامل





[ Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-23 ]

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

جدول ٤ 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 [۹ ، ۰/۱۱] نگاشت می‌کند. سپس، مقادیر حاصل به‌صورت 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 (۰.۰۰٤۰) را به خود اختصاص داده است.

### ۳.٤. رتبه‌بندی نهایی

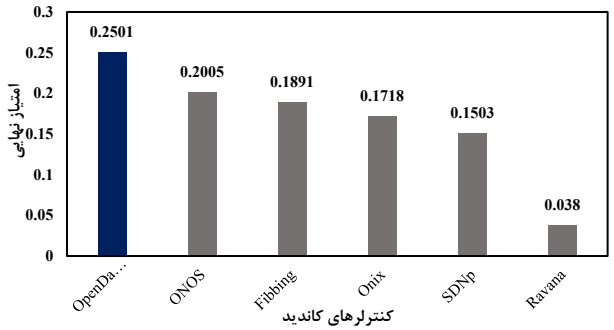
برای استخراج رتبه‌بندی نهایی، از عملیات ضرب داخلی ماتریس‌ها استفاده می‌شود. با انجام عملیات ضرب داخلی ماتریس (ضرب ماتریس جدول ۵ در بردار جدول ۳)، نمره نهایی هر پلتفرم استخراج گردید. خروجی این عملیات، بردار اولویت کلی است که امتیاز نهایی هر پلتفرم را مشخص می‌کند:

$$[Onix, Ravana, ODL, ONOS, Fibbing, SDNp] = [۰,۱۷۱۸, ۰,۰۳۸۰, ۰,۲۵۰۱, ۰,۲۰۰۵, ۰,۱۸۹۱, ۰,۱۵۰۳]$$

بر اساس این نتایج، رتبه‌بندی کنترل‌کننده‌ها برای استقرار در محیط **IIoT** به شرح نشان داده شده در جدول ٦ است. فاصله معنادار امتیاز **ODL** (۰.۲۵۰۱) با سایر رقبا، نشان‌دهنده انطباق بسیار بالای این پلتفرم با الگوی وزنی تعریف شده برای صنعت است.

**جدول ٦. رتبه بندی 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 کنترل‌کننده‌های 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، کنترل‌کننده **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.

### ٤.٤. تحلیل مهندسی و بحث

دستاورد کلیدی این پژوهش، تفسیر مهندسیِ 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



فصلنامهٔ علمی - پژوهشی فرماندهی و کنترل، سال دهم، شمارهٔ سه، پاییز ۱٤۰۵

[ Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-23 ]

مدل‌محور **(MD-SAL)** آن است. از آنجا که بخش عمده‌ای از کارخانجات صنعتی دارای بسترهای ارتقایی و تجهیزات میراثی (**Brownfield**) هستند، این پلتفرم با فراهم آوردن توازن میان کارایی و تنوع واسطهای 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**، **OVSDB**، **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 واسطهای 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 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.

## ۵.٤. 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 **Throughput** و**Latency** ) 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.

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

| شاخص عملکردی تجربی (آزمایشگاهی) | پلتفرمONOS | پلتفرم OpenDaylight | تحلیل انطباق با مدلAHP |
|---|---|---|---|
| بیشینه توان پردازش جریان - (Cbench Throughput) | $\approx 1.8 * 10^6$ *flows/sec* | $\approx 1.2 * 10^6$ *flows/sec* | برتری تجربی **ONOS** در سرعت خام که در مدل با وزن ۲۵.۱٤٪ 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 ۳٤٪ در نرخ پاسخ | افت ۱۱٪ در نرخ پاسخ | پایداری بالاتر **ODL** به واسطه لایه **MD-SAL** در شرایط ترافیک ناهمگن. |





[ Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-23 ]

| | | | |
|---|---|---|---|
| امتیاز نهایی مدل ترکیبی **AHP** پیشنهادی | ۰.۲۰۰۵ (رتبه۲) | ۰.۲۵۰۱ (رتبه ۱) | پیروزی ODL به دلیل انعطاف چندمعیاره علی‌رغم سرعت خام کمتر ONOS |

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 ٤.٠ (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.

## ٦.٤. 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.

### ١.٦.٤. 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 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:

$$w_j^* = w_j \times \left(\frac{1 - w_k^*}{1 - w_k}\right), \quad \forall j \neq k \tag{۷}$$

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

$$R_i^* = \sum_{j=1}^{n} w_j^* \cdot a_{ij} = w_k^* \cdot a_{ik} + \left(\frac{1 - w_k^*}{1 - w_k}\right) \sum_{j \neq k}^{n} w_j \cdot a_{ij} \tag{۸}$$

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

$$\frac{dR_i^*}{dw_k^*} = a_{ik} - \frac{\sum_{j \neq k}^{n} w_j \cdot a_{ij}}{1 - w_k} \tag{۹}$$

### ٢.٦.٤. 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 ( $w_1$ $= w_2 = 0.2514$) در شبکه **IIoT** هستند. نکته ریاضی بسیار حائز 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:

(۱۰)

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

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





[ Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-23 ]

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(**C**٤) و تنوع رابط‌های جنوبی(**C**٧) است.

۳.٦.٤. تعریف سناریوهای تنش عملیاتی

جهت به چالش کشیدن قطعی مدل در محیط‌های کاربردی واقعی و سنجش تاب‌آوری تصمیم‌گیری در استقرارهای گوناگون صنعت ٤.٠، 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.

سناریوی۱: 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» (**C**٤) به بیش از دو برابر افزایش یافته (**w**٤=۰,۳۰۰۰) و وزن سایر معیارها به صورت تناسبی فشرده شده است.

سناریوی۲: شبکه کاملاً نوساز مخابراتی/صنعتی (**Greenfield / Ultra-Performance Focus**): سناریوی ساخت خطوط تولید کاملاً جدید و تماما **SDN**. در این سناریو نیاز به سازگاری با سیستم‌های قدیمی صفر در نظر گرفته شده (**w**٤=۰,۰۰۰۰) و حداکثر وزن ممکن (مجموعاً ٧۰٪) به معیارهای سرعت، توان گذردهی و مقیاس‌پذیری تخصیص یافته است (**w**۱=**w**۲= ۰,۳۵۰۰).

**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 | ۰.۲۵۱٤ | ۰.۱۷۵۰ | ۰.۳۵۰۰ | ۰.۱۰۰۰ |
| C۲ | مقیاس‌پذیری | ۰.۲۵۱٤ | ۰.۱۷۵۰ | ۰.۳۵۰۰ | ۰.۱۰۰۰ |
| C۳ | تعادل بار | ۰.۱۳۰۱ | ۰.۱۰۲۵ | ۰.۰۷۳۲ | ۰.۱۰۰۰ |
| C٤ | پشتیبانی از شبکه سنتی | ۰.۱۳۰۱ | ۰.۳۰۰۰ | ۰.۰۰۰۰ | ۰.۱۰۰۰ |
| C٥ | مستندات فنی | ۰.۰٦۷۲ | ۰.۰٥۲۹ | ۰.۰۳۷۸ | ۰.۱۰۰۰ |
| C٦ | ماژولار بودن | ۰.۰٦۷۲ | ۰.۰٥۲۹ | ۰.۰۳۷۸ | ۰.۱۰۰۰ |
| C۷ | تنوع رابط جنوبی | ۰.۰۳٥٦ | ۰.۰۲۸۰ | ۰.۰۲۰۰ | ۰.۱۰۰۰ |
| C۸ | سازگاری پلتفرم | ۰.۰۳٥٦ | ۰.۰۲۸۰ | ۰.۰۲۰۰ | ۰.۱۰۰۰ |
| C۹ | مجازی‌سازی شبکه | ۰.۰۱٥۷ | ۰.۰۱۲٤ | ۰.۰۰۸۸ | ۰.۱۰۰۰ |
| C۱۰ | سطح پایداری و تکامل فنی | ۰.۰۱٥۷ | ۰.۰۱۲٤ | ۰.۰۰۸۸ | ۰.۱۰۰۰ |
| Σ | مجموع ضرایب اهمیت | ۱.۰۰۰۰ | ۱.۰۰۰۰ | ۱.۰۰۰۰ | ۱.۰۰۰۰ |

**جدول ۹. مقایسه امتیاز نهایی ($R_i$) و جایگاه رتبه‌بندی پلتفرم‌ها در سناریوهای تنش.**

| پلتفرم کاندید | امتیاز (رتبه) حالت مبنا | امتیاز (رتبه) سناریوی۱ | امتیاز (رتبه) سناریوی۲ | امتیاز (رتبه) سناریوی۳ | ضریب واریانس رتبه | وضعیت پایداری نهایی |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **OpenDaylight** | ۰.۲٥۰۱ | ۰.۲٥۲۸ | ۰.۲۱۹۷ | ۰.۲۸۷۲ | ۰.۰۰ | پایداری مطلق (Robust) |
| **ONOS** | ۰.۲۰۰٥ | ۰.۱٤۹٤ | ۰.۱۹٥٦ | ۰.۲۳۲۰ | ۰.۲٥ | **پایداری بالا** |
| **Fibbing** | ۰.۱۸۹۱ | ۰.۲۰٤۸ | ۰.۱٦٥٤ | ۰.۱٦۸۱ | ۰.٦۹ | **وابسته به معماری سنتی** |
| **Onix** | ۰.۱۷۱۸ | ۰.۱۲٦۹ | ۰.۱۷۹٤ | ۰.۱٥۱٤ | ۰.۹۲ | **نوسان در رده‌های میانی** |
| **SDNp** | ۰.۱٥۰۳ | ۰.۱۷٤۲ | ۰.۱٤۳٦ | ۰.۰۹٦۷ | ۰.٦۹ | **پایداری متوسط** |



[ Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-23 ]

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

سناریوی۳: 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 ($w_j$=۰،۱۰۰۰) شدند. توزیع عددی اوزان در این چهار سناریو در جدول ۸ خلاصه شده است:

٤.٦.٤. 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:

٥.٦.٤. 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 تعریف‌شده (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**): سناریوی۲ (**Greenfield**) چالش‌برانگیزترین شرایط را برای **ODL** رقم می‌زند، زیرا وزن معیار شبکه میراثی(**C٤**) به طور کامل حذف شده است. در این سناریو، فاصله امتیازی **ONOS** با **ODL** به کمترین مقدار ممکن ۰.۰۰٤۹ 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 شبکه فراتر رود، امری که در محیط‌های صنعتی نسل ٤.۰ 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 سناریومحور اثبات نمود که نتایج مدل تصادفی نبوده، دچار سوگیری کارشناسی نیست و رتبه‌بندی ارائه‌شده 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 نرم‌افزارمحور 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 ٦ کنترل‌کننده توزیع‌شده 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 بلادرنگ 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، پیش‌شرط 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،





[ Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-23 ]

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 قابل‌تعمیم 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 تحت‌تاثیر 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 عدم‌قطعیت (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 عملیاتیِ تأخیر، اتلاف بسته و تاب‌آوری کنترلر در برابر حملات سایبری، از مهم‌ترین محورهای تحقیقاتی برای مطالعات آینده محسوب می‌شود.

## ٦. مراجع


[١] Zhang, T., Xue, C., Wang, J., Yun, Z., Lin, N., & Han, S. (٢٠٢٤). A survey on industrial Internet of Things (IIoT) Testbeds for connectivity research. *arXiv preprint arXiv:2404.17485*.

[٢] Safaei, D., Sobhani, A., & Kiaei, A. A. (٢٠٢٤). DeePLT: personalized lighting facilitates by trajectory prediction of recognized residents in the smart home. *International Journal of Information Technology*, *16*(٥), ٢٩٨٧-٢٩٩٩.

[٣] Khasteh, S. H., Shouraki, S. B., & Kiaei, A. A. (٢٠٠٨, November). A new sufficient condition for ١-coverage to imply connectivity. In *2008 Third International Conference on Digital Information Management* (pp. ٤٩٥-٤٩٩). IEEE.

[٤] Dadashtabar Ahmadi, K., Kiaei, A. A., & Abbaszadeh, M. A. (٢٠٢٢). Autonomous Navigation of Wheeled Robot using a Deep Reinforcement Learning Based Approach. *C4I Journal*, *6*(٢), ٣١-٤٥.

[٥] Sun, D., Hu, J., Wu, H., Wu, J., Yang, J., Sheng, Q. Z., & Dustdar, S. (٢٠٢٣). A comprehensive survey on collaborative data-access enablers in the IIoT. *ACM Computing Surveys*, *56*(٢), ١-٣٧.

[٦] Hou, K. M., Diao, X., Shi, H., Ding, H., Zhou, H., & De Vaulx, C. (٢٠٢٣). Trends and challenges in AIoT/IIoT/IoT implementation. *Sensors*, *23*(١١), ٥٠٧٤.

[٧] Shakya, S. R., & Jha, S. (٢٠٢٢). Challenges in industrial internet of things (iiot). In *Industrial Internet of Things* (pp. ١٩-٣٩). CRC Press.

[٨] Peter, O., Pradhan, A., & Mbohwa, C. (٢٠٢٣). Industrial internet of things (IIoT): opportunities, challenges, and requirements in manufacturing businesses in emerging economies. *Procedia Computer Science*, *217*, ٨٥٦-٨٦٥.

[٩] Ali, J., Iwendi, C., Shan, G., Wu, H. C., Alenazi, M. J., Faheem, Z. B., & Biamba, C. N. (٢٠٢٤). Performance Optimization of Software-Defined Industrial Internet-of-Things (SD-IIoT). *IEEE access*, *12*, ١٦٩٦٥٩-١٦٩٦٧٠.

[١٠] Chilakapati, V. K., Keshireddy, S. R., Nagumotu, V. T., Kavuluri, H. V. R., Pathani, A. K., & Dasari, A. (٢٠٢٢). Review on Network Virtualization and SDN in Industrial IoT (IIoT). *International Journal of Artificial Intelligence, Data Science, and Machine Learning*, *3*(١), ١٦٢-١٧٢.

[١١] Maleh, Y., Qasmaoui, Y., El Gholami, K., Sadqi, Y., & Mounir, S. (٢٠٢٣). A comprehensive survey on SDN security: threats, mitigations, and future directions. *Journal of Reliable Intelligent Environments*, *9*(٢), ٢٠١-٢٣٩.

[١٢] Jalili, A., Keshtgari, M., Akbari, R., & Javidan, R. (٢٠١٩). Multi criteria analysis of controller placement problem in software defined networks. *Computer Communications*, *133*, ١١٥-١٢٨.

[١٣] Gupta, N., Maashi, M. S., Tanwar, S., Badotra, S., Aljebreen, M., & Bharany, S. (٢٠٢٢). A comparative study of software defined networking controllers using mininet. *Electronics*, *11*(١٧), ٢٧١٥.

[١٤] Prabha, C., Goel, A., & Singh, J. (٢٠٢٢, June). A survey on sdn controller evolution: A brief review. In *2022 7th International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)* (pp. ٥٦٩-٥٧٥). IEEE.

[١٥] Ruchel, L. V., Turchetti, R. C., & de Camargo, E. T. (٢٠٢٢). Evaluation of the robustness of SDN controllers ONOS and ODL. *Computer Networks*, *219*, ١٠٩٤٠٣.

[١٦] Singh, A., Kaur, N., & Kaur, H. (٢٠٢٢). Extensive performance analysis of OpenDayLight (ODL) and open network operating system (ONOS) SDN controllers. *Microprocessors and Microsystems*, *95*, ١٠٤٧١٥.

[١٧] Christou, I. T., Kefalakis, N., Soldatos, J. K., & Despotopoulou, A. M. (٢٠٢٢). End-to-end industrial IoT platform for Quality ٤,٠ applications. *Computers in Industry*, *137*, ١٠٣٥٩١.






[ Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-23 ]

[۱۸] Hnamte, V., Najar, A. A., Nhung-Nguyen, H., Hussain, J., & Sugali, M. N. (۲۰۲٤). DDoS attack detection and mitigation using deep neural network in SDN environment. *Computers & Security*, *138*, ۱۰۳٦٦۱.

[۱۹] Zavvar, M., Azar, K. K., Entezami, M., Asgharighajari, M., Zakarian, A., Golkarieh, A., ... & Navimipour, N. J. (۲۰۲٦). 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. ٥۹۸-٦۰۲). 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), ۱۰۳۱-۱۰٥۹.

[۲۲] Ali, J., Khalid, M., Shan, G., Mohsin, A. R., Ahmad, S., & Roh, B. H. (۲۰۲٥). 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. (۲۰۲٤, August). AHP-TOPSIS-Based Reliable Switch Migration Algorithm for Software-Defined Networks. In *The International Conference on Recent Innovations in Computing* (pp. ۲۲۲-۲۳٦). Singapore: Springer Nature Singapore.

[۲٤] Abuabdallah, A. G. (۲۰۲٦). Performance-based evaluation of SDN controllers: OpenDayLight and RYU. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, *13*(۱), ۳٥.

[۲٥] Younis, H., & Hamarsheh, M. M. (۲۰۲٥). ONOS Flood Defender: A Real-Time Flood Attacks Detection and Mitigation System in SDN Networks. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, *37*(٤-٥), e۸۳۸۸.

[۲٦] Yao, R. A., & Guinko, F. T. (۲۰۲٥, 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. ٤٥). Springer Nature.

[۲۷] Dilek, S., Irgan, K., Guzel, M., Ozdemir, S., Baydere, S., & Charnsripinyo, C. (۲۰۲۲). QoS-aware IoT networks and protocols: A comprehensive survey. *International Journal of Communication Systems*, *35*(۱۰), e٥۱٥٦.

[۲۸] Jalili, A. (۲۰۲٥). Enhancing Software-Defined Networking (SDN) Resilience against Cyberattacks: A Markov Model-Based Approach. *International Journal of Web Research*, *8*(۲), ۲٥-۳۹.

[۲۹] Bertolini, M., Braglia, M., & Carmignani, G. (۲۰۰٦). Application of the AHP methodology in making a proposal for a public work contract. *International Journal of Project Management*, *24*(٥), ٤۲۲-٤۳۰.

[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. (۲۰۲٥). Enhancing quality of service in SDNs through Pareto-optimized controller placement using NS-MF algorithm. *International Journal of Nonlinear Analysis and Applications*, *16*(۹), ۱٥۷-۱٦۷.

[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*(٦), ۱-٤۰.

[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)*.

[۳٤] Katta, N., Zhang, H., Freedman, M., & Rexford, J. (۲۰۱٥, 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).

[۳٥] Vissicchio, S., Tilmans, O., Vanbever, L., & Rexford, J. (۲۰۱٥, August). Central control over distributed routing. In *Proceedings of the 2015 ACM Conference on Special Interest Group on Data Communication* (pp. ٤۳-٥٦).

[۳٦] Berde, P., Gerola, M., Hart, J., Higuchi, Y., Kobayashi, M., Koide, T., ... & Parulkar, G. (۲۰۱٤, August). ONOS: towards an open, distributed SDN OS. In *Proceedings of the third workshop on Hot topics in software defined networking* (pp. ۱-٦).

[۳۷] Medved, J., Varga, R., Tkacik, A., & Gray, K. (۲۰۱٤, 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. ۱-٦). IEEE.



[ Downloaded from ic4i-journal.ir on 2026-11-23 ]