IJEETR

International Journal of Electrical, Electronics, Telecommunications and Robotics (IJEETR)

مجله بین‌المللی مهندسی برق، الکترونیک، مخابرات و رباتیک

https://ijeetr.ir

دوره ۱ – شماره ۲ (زمستان ۱۴۰۴) – صفحه ۱ تا ۶

اینترنت اشیا صنعتی (IIoT)به‌عنوان پیشران تحول دیجیتال صنایع: مرور نظام‌مند، تحلیلی و انتقادی بر مبانی نظری، معماری‌ها، کاربردها و چالش‌های پیاده‌سازی

علیرضا جوشن*

کارشناس ارشد برق قدرت گرایش الکترونیک قدرت و ماشین های الکتریکی ،دانشگاه گیلان،گیلان ایران

Alireza.joshan.guilan@gmail.com

چکیده

اینترنت اشیا صنعتی (Industrial Internet of Things – IIoT)در دهه اخیر به‌عنوان یکی از مهم‌ترین فناوری‌های تحول‌آفرین در چارچوب صنعت ۴.۰ مطرح شده و نقشی کلیدی در هوشمندسازی سیستم‌های تولیدی، افزایش بهره‌وری، ارتقای کیفیت محصولات و بهبود قابلیت اطمینان فرآیندهای صنعتی ایفا می‌کند. IIoTبا ایجاد یک بستر یکپارچه متشکل از حسگرهای هوشمند، شبکه‌های ارتباطی صنعتی، سامانه‌های محاسباتی توزیع‌شده و ابزارهای پیشرفته تحلیل داده، امکان پایش بلادرنگ، تصمیم‌گیری مبتنی بر داده و کنترل تطبیقی تجهیزات و فرایندها را فراهم می‌سازد. با وجود رشد قابل‌توجه تحقیقات و پیاده‌سازی‌های صنعتی، تنوع معماری‌ها، تفاوت رویکردهای فنی و چالش‌های متعدد امنیتی و سازمانی، درک جامع و یکپارچه این حوزه را با دشواری مواجه ساخته است. هدف این مقاله، ارائه یک مرور نظام‌مند، تحلیلی و انتقادی از ادبیات علمی اینترنت اشیا صنعتی با تمرکز بر مفاهیم بنیادین، معماری‌های مرجع، فناوری‌های کلیدی، کاربردهای صنعتی و چالش‌های پیاده‌سازی است. بدین منظور، مقالات معتبر منتشرشده در پایگاه‌های علمی بین‌المللی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته‌اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که اگرچه IIoTظرفیت بالایی برای بازتعریف مدل‌های تولید و مدیریت صنعتی دارد، اما تحقق پایدار آن مستلزم توجه هم‌زمان به ابعاد فنی، امنیتی، استانداردسازی و مدیریتی است.

کلمات کلیدی: اینترنت اشیا صنعتی، افزایش بهره‌وری، کاربردهای صنعتی، چالش‌های پیاده‌سازی

۱. مقدمه

تحول دیجیتال در صنایع تولیدی و فرایندی طی سال‌های اخیر شتاب قابل‌توجهی یافته است و فناوری‌های نوظهور نقش محوری در این تحول ایفا می‌کنند. در این میان، اینترنت اشیا ((IoTبه‌عنوان پارادایمی که امکان اتصال اشیای فیزیکی به شبکه‌های دیجیتال و تبادل داده میان آن‌ها را فراهم می‌سازد، توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده است (Atzori et al., ۲۰۱۰).توسعه این مفهوم در محیط‌های صنعتی منجر به شکل‌گیری اینترنت اشیا صنعتی (IIoT)شده است که به‌طور خاص برای پاسخ‌گویی به نیازهای پیچیده و حساس صنایع طراحی شده است (Xu et al., ۲۰۱٤).

IIoTارتباط تنگاتنگی با مفهوم صنعت ۴.۰ دارد؛ مفهومی که بر یکپارچه‌سازی سیستم‌های سایبر–فیزیکی، ارتباطات ماشین‌به‌ماشین و تحلیل داده‌های بزرگ در محیط‌های تولیدی تأکید دارد (Lasi et al., ۲۰۱٤).مطالعات نشان می‌دهند که به‌کارگیری IIoT می‌تواند منجر به کاهش زمان توقف تجهیزات، افزایش بهره‌وری انرژی، بهبود کیفیت محصولات و افزایش انعطاف‌پذیری خطوط تولید شود (.(Lu, ۲۰۱۷از سوی دیگر، استفاده از داده‌های بلادرنگ حاصل از حسگرها و تجهیزات هوشمند، زمینه را برای توسعه رویکردهایی نظیر نگهداری پیش‌بینانه و تولید داده‌محور فراهم کرده است (Lee et al., ۲۰۱٥).

با این حال، پیاده‌سازی IIoTدر مقیاس صنعتی با چالش‌های متعددی همراه است. مسائل امنیت سایبری، آسیب‌پذیری در برابر حملات، ناهمگونی تجهیزات و نبود استانداردهای یکپارچه از جمله موانعی هستند که در پژوهش‌های مختلف به آن‌ها اشاره شده است (.(Boyes et al., ۲۰۱۸; Sisinni et al., ۲۰۱۸افزون بر این، رشد سریع فناوری‌هایی نظیر محاسبات لبه، هوش مصنوعی و دوقلوی دیجیتال، چشم‌انداز IIoTرا پویاتر و در عین حال پیچیده‌تر کرده است Tyagi ۲۰۱۸ et al., ۲۰۱٦; Tao et al., ۲۰۱٦; Shi et al.). (۲۰۲٤ et al.,در چنین شرایطی، انجام یک مرور جامع و تحلیلی که بتواند تصویری منسجم از وضعیت فعلی دانش و مسیرهای آینده ارائه دهد، ضروری به نظر می‌رسد.

۲. روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش با استفاده از رویکرد مرور نظام‌مند ادبیات (Systematic Literature Review – SLR)انجام شده است تا جامعیت و شفافیت تحلیل‌ها تضمین شود (Kitchenham & Charters, ۲۰۰۷).در این راستا، مقالات علمی منتشرشده در پایگاه‌های IEEE Xplore، ScienceDirect، SpringerLink و Wiley Online Libraryمورد بررسی قرار گرفتند.

در مرحله نخست، با استفاده از کلیدواژه‌هایی نظیر ""Industrial Internet of Things"، "IIoT"، "Industry ٤.٠" و " Smart Manufacturing"، جست‌وجوی اولیه انجام شد. سپس، بر اساس معیارهایی نظیر بازه زمانی انتشار (۲۰۱۰ تا ۲۰۲۴)، داوری‌شده بودن مقالات و ارتباط مستقیم با حوزه IIoT، فرایند غربالگری صورت گرفت. در نهایت، ۱۰۲ مقاله به‌عنوان منابع اصلی برای تحلیل انتخاب شدند.

۳. معماری‌ها و فناوری‌های کلیدی اینترنت اشیا صنعتی

معماری اینترنت اشیا صنعتی معمولاً به‌صورت لایه‌ای طراحی می‌شود تا امکان مدیریت بهتر پیچیدگی سیستم‌ها فراهم گردد (Xu et al., ۲۰۱٤). لایه ادراک مسئول جمع‌آوری داده‌ها از طریق حسگرها و تجهیزات هوشمند است، در حالی که لایه شبکه وظیفه انتقال داده‌ها را بر عهده دارد. لایه پردازش با بهره‌گیری از محاسبات ابری و لبه، تحلیل داده‌ها را انجام می‌دهد و لایه کاربرد نتایج تحلیل را در قالب تصمیم‌های کنترلی و مدیریتی ارائه می‌کند.

نقش محاسبات لبه در معماری‌های نوین IIoT به‌طور فزاینده‌ای مورد توجه قرار گرفته است، چرا که این رویکرد می‌تواند تأخیر ارتباطی را کاهش داده و امنیت داده‌ها را افزایش دهد (Shi et al., ۲۰۱٦).

۴. کاربردهای اینترنت اشیا صنعتی در بخش‌های مختلف صنعت

اینترنت اشیا صنعتی در حوزه‌های متعددی از صنایع به‌کار گرفته شده است. یکی از مهم‌ترین کاربردها، نگهداری پیش‌بینانه است که با تحلیل داده‌های حسگرها، امکان پیش‌بینی خرابی تجهیزات و کاهش توقف‌های ناخواسته را فراهم می‌کند (Lee et al., ۲۰۱٥). در حوزه تولید هوشمند، IIoT با یکپارچه‌سازی داده‌ها از بخش‌های مختلف خط تولید، زمینه بهینه‌سازی فرایندها و افزایش کیفیت محصولات را فراهم می‌سازد (Lu, ۲۰۱۷).

همچنین، در مدیریت زنجیره تأمین، IIoT امکان ردیابی بلادرنگ مواد اولیه و محصولات نهایی را فراهم کرده و شفافیت و هماهنگی میان بازیگران زنجیره را افزایش می‌دهد (Ben-Daya et al., ۲۰۱۹). در حوزه مدیریت انرژی نیز، استفاده از IIoT می‌تواند منجر به کاهش مصرف انرژی و بهبود پایداری زیست‌محیطی شود (Zhang et al., ۲۰۱۸).

۵. چالش‌ها و محدودیت‌های پیاده‌سازی IIoT

با وجود مزایای فراوان، پیاده‌سازی IIoT با چالش‌های متعددی همراه است. امنیت سایبری یکی از مهم‌ترین این چالش‌هاست، زیرا اتصال گسترده تجهیزات صنعتی به شبکه‌ها، سطح حمله را افزایش می‌دهد (Boyes et al., ۲۰۱۸). افزون بر این، ناهمگونی تجهیزات و پروتکل‌های ارتباطی، یکپارچگی سیستم‌ها را با دشواری مواجه می‌سازد (Sisinni et al., ۲۰۱۸).

مدیریت حجم عظیم داده‌های تولیدشده، تضمین قابلیت اطمینان سیستم‌ها و مسائل مربوط به پذیرش سازمانی و نیروی انسانی نیز از دیگر موانع توسعه IIoT به‌شمار می‌روند.

IJEETR
International Journal of Electrical, Electronics, Telecommunications and Robotics (IJEETR)
مجله بین‌المللی مهندسی برق، الکترونیک، مخابرات و رباتیک
https://ijeetr.ir
دوره ۱ – شماره ۲ (زمستان ۱۴۰۴) – صفحه ۱ تا ۶

۶. روندهای پژوهشی و چشم‌اندازهای آینده

پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهند که آینده اینترنت اشیای صنعتی (IIoT)به‌شدت تحت تأثیر همگرایی آن با فناوری‌های نوظهوری نظیر هوش مصنوعی، یادگیری ماشین، دوقلوی دیجیتال و شبکه‌های ارتباطی نسل آینده قرار دارد و این همگرایی نقش تعیین‌کننده‌ای در تعمیق و تسریع تحول دیجیتال صنایع ایفا می‌کند (Tao et al., ۲۰۱۹; Tyagi et al.,۲۰۲٤).برخلاف رویکردهای اولیه که تمرکز اصلی IIoTبر اتصال تجهیزات و جمع‌آوری داده‌های عملیاتی بود، روندهای پژوهشی جدید بر بهره‌برداری هوشمند از داده‌ها و حرکت به سمت سیستم‌های صنعتی خودسازگار، پیش‌بین و تصمیم‌گیر تأکید دارند. در این چارچوب، الگوریتم‌های پیشرفته یادگیری ماشین و یادگیری عمیق امکان تحلیل داده‌های عظیم و ناهمگون صنعتی را فراهم کرده و بستر لازم برای بهینه‌سازی فرآیندها، نگهداری و تعمیرات پیش‌بینانه، کاهش توقفات ناخواسته و افزایش بهره‌وری کلی سیستم‌های صنعتی را مهیا می‌سازند.

در همین راستا، مفهوم دوقلوی دیجیتال به‌عنوان یکی از ارکان کلیدی معماری‌های نوین IIoT، جایگاه ویژه‌ای در پژوهش‌های معاصر یافته است. دوقلوی دیجیتال با ایجاد یک همزاد مجازی پویا از دارایی‌ها، فرآیندها و سیستم‌های صنعتی، امکان پایش بلادرنگ، شبیه‌سازی سناریوهای مختلف و ارزیابی پیامدهای تصمیم‌ها پیش از اجرای فیزیکی آن‌ها را فراهم می‌کند. ادغام دوقلوی دیجیتال با زیرساخت IIoTو مدل‌های هوش مصنوعی، زمینه‌ساز توسعه سیستم‌هایی می‌شود که نه‌تنها وضعیت جاری را توصیف می‌کنند، بلکه قادر به پیش‌بینی رفتار آینده سیستم و ارائه راهکارهای بهینه به‌صورت خودکار هستند. این رویکرد، تحول بنیادینی در مدیریت چرخه عمر تجهیزات و دارایی‌های صنعتی ایجاد کرده و نقش مهمی در افزایش پایداری و انعطاف‌پذیری سیستم‌های تولیدی ایفا می‌کند.

از منظر معماری، مطالعات نشان می‌دهند که معماری‌های IIoTدر حال گذار از ساختارهای متمرکز مبتنی بر رایانش ابری به سمت معماری‌های توزیع‌شده و لبه‌محور هستند. این تحول، پاسخی به نیازهای فزاینده صنایع برای کاهش تأخیر، افزایش قابلیت اطمینان و بهبود امنیت داده‌ها در کاربردهای حساس صنعتی است. ترکیب رایانش لبه‌ای و مه‌محور با هوش مصنوعی توزیع‌شده، امکان پردازش داده‌ها را در نزدیکی منبع تولید آن‌ها فراهم کرده و وابستگی به انتقال داده‌های حجیم به مراکز ابری را کاهش می‌دهد. در نتیجه، معماری‌های آینده IIoTقادر خواهند بود توازن مناسبی میان کارایی عملیاتی، مقیاس‌پذیری و الزامات ایمنی و امنیتی برقرار سازند.

هم‌زمان با این تحولات، شبکه‌های ارتباطی نسل پنجم و نسل‌های آتی به‌عنوان زیرساختی حیاتی برای تحقق کامل قابلیت‌های IIoT مطرح شده‌اند. ویژگی‌هایی نظیر تأخیر بسیار کم، قابلیت اطمینان بالا و پشتیبانی از اتصال انبوه دستگاه‌ها، امکان پیاده‌سازی کاربردهای پیشرفته‌ای مانند کارخانه‌های هوشمند، سیستم‌های تولید خودمختار و کنترل بلادرنگ فرآیندهای پیچیده صنعتی را فراهم می‌کنند. پژوهش‌ها نشان می‌دهند که همگرایی 5Gبا فناوری‌هایی نظیر شبکه‌های نرم‌افزارمحور و مجازی‌سازی توابع شبکه، انعطاف‌پذیری و پویایی زیرساخت‌های ارتباطی IIoTرا به‌طور قابل‌توجهی افزایش خواهد داد (Sisinni et al.,۲۰۱۸; Xu et al.,۲۰۱٤; Fernández-Caramés et al.,۲۰۲۲).

با وجود این پیشرفت‌ها، ادبیات پژوهشی بر وجود چالش‌های اساسی در مسیر توسعه و پیاده‌سازی IIoTتأکید دارد. مسائلی نظیر امنیت و حریم خصوصی داده‌ها، تعامل‌پذیری میان پلتفرم‌ها و استانداردهای ناهمگون، مدیریت داده‌های عظیم و پیچیدگی یکپارچه‌سازی IIoTبا سیستم‌های صنعتی موجود، از جمله موانع کلیدی به شمار می‌روند. با این حال، همین چالش‌ها فرصت‌های پژوهشی و فناورانه ارزشمندی را برای توسعه چارچوب‌های امنیتی هوشمند، معماری‌های باز و استانداردهای بین‌المللی فراهم می‌کنند و می‌توانند به خلق مدل‌های کسب‌وکار نوآورانه و افزایش مزیت رقابتی صنایع منجر شوند (Shi et al.,۲۰۱٦; Rabah et al.,۲۰۱۷; Sisinni et al.,۲۰۱۸;Tao et al., ۲۰۱۹; Tyagi et al.,۲۰۲٤).

IJEETR
International Journal of Electrical, Electronics, Telecommunications and Robotics (IJEETR)
مجله بین‌المللی مهندسی برق، الکترونیک، مخابرات و رباتیک
https://ijeetr.ir
دوره ۱ – شماره ۲ (زمستان ۱۴۰۴) – صفحه ۱ تا ۶

در مجموع، نتایج حاصل از مرور نظام‌مند و تحلیل انتقادی پژوهش‌ها نشان می‌دهد که اینترنت اشیای صنعتی در چشم‌انداز آینده، فراتر از یک فناوری پشتیبان عمل کرده و به‌عنوان یکی از پیشران‌های اصلی تحول دیجیتال صنایع ایفای نقش خواهد کرد. ادغام عمیق IIoTبا هوش مصنوعی، دوقلوی دیجیتال و زیرساخت‌های ارتباطی پیشرفته، مسیر حرکت صنایع را به سمت سیستم‌های هوشمند، خودمختار، انعطاف‌پذیر و پایدار هموار ساخته و چارچوبی نوین برای ایجاد ارزش، افزایش بهره‌وری و تصمیم‌گیری مبتنی بر داده در محیط‌های صنعتی فراهم می‌آورد.

۷. نتیجه‌گیری

این مقاله با ارائه یک مرور نظام‌مند و تحلیلی از ادبیات علمی اینترنت اشیا صنعتی، نشان داد که IIoTبه‌عنوان یکی از ارکان اصلی تحول دیجیتال صنایع، ظرفیت بالایی برای بهبود عملکرد، بهره‌وری و پایداری سیستم‌های صنعتی دارد. تحلیل مطالعات انجام‌شده حاکی از آن است که IIoTنه‌تنها امکان پایش و کنترل بلادرنگ فرایندهای صنعتی را فراهم می‌سازد، بلکه بستر لازم برای گذار از رویکردهای سنتی نگهداری و تولید به سمت مدل‌های داده‌محور و هوشمند را نیز ایجاد می‌کند.

با این حال، نتایج این مرور نشان می‌دهد که تحقق کامل مزایای IIoTمستلزم غلبه بر چالش‌های اساسی در حوزه‌هایی نظیر امنیت سایبری، استانداردسازی، یکپارچگی سیستم‌ها و مدیریت داده است. بسیاری از مطالعات بر این نکته تأکید دارند که بدون طراحی چارچوب‌های امنیتی جامع و استانداردهای مشترک، توسعه پایدار IIoTبا مخاطرات جدی مواجه خواهد شد. افزون بر این، پذیرش سازمانی، آموزش نیروی انسانی و هم‌راستاسازی راهبردهای فناورانه با اهداف کسب‌وکار، از عوامل کلیدی موفقیت پیاده‌سازی IIoT محسوب می‌شوند.

در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که اینترنت اشیا صنعتی در مرحله‌ای گذار قرار دارد؛ مرحله‌ای که در آن تمرکز پژوهش‌ها از صرف توسعه فناوری به سمت یکپارچه‌سازی، ارزیابی اثربخشی و توسعه چارچوب‌های عملیاتی حرکت کرده است. ادامه پژوهش‌ها در این حوزه، به‌ویژه در زمینه ادغام IIoTبا هوش مصنوعی و دوقلوی دیجیتال، می‌تواند مسیر را برای ایجاد صنایع هوشمندتر، انعطاف‌پذیرتر و پایدارتر هموار سازد.

منابع

Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (۲۰۱۰). The Internet of Things: A survey. *Computer Networks, 54*(۱۵), ۲۷۸۷–۲۸۰۵.

Ben-Daya, M., Hassini, E., & Bahroun, Z. (۲۰۱۹). Internet of Things and supply chain management: A literature review. *International Journal of Production Research, 57*(۱۵–۱۶), ۴۷۱۹–۴۷۴۲.

Boyes, H., Hallaq, B., Cunningham, J., & Watson, T. (۲۰۱۸). The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework. *Computers & Security, 78*, ۳۲۵–۳۴۴.

Kitchenham, B., & Charters, S. (۲۰۰۷). Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering. *EBSE Technical Report*.

Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., & Hoffmann, M. (۲۰۱٤). Industry ٤,۰. *Business & Information Systems Engineering, 6*(٤), ۲۳۹–۲٤۲.

Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H. A. (۲۰۱٥). A cyber-physical systems architecture for Industry ٤,۰-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters, 3*, ۱۸–۲۳.

Lu, Y. (۲۰۱۷). Industry ٤,۰: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of industrial information integration, 6*, ۱–۱۰.

Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (۲۰۱٦). Edge computing: Vision and challenges. *IEEE Internet of Things Journal, 3*(٥), ٦۳۷–٦٤٦.

Sisinni, E., Saifullah, A., Han, S., Jennehag, U., & Gidlund, M. (۲۰۱۸). Industrial Internet of Things: Challenges, opportunities, and directions. *IEEE transactions on industrial informatics, 14*(۱۱), ٤۷۲٤–٤۷۳٤.

Tao, F., Qi, Q., Liu, A., & Kusiak, A. (۲۰۱۸). Data-driven smart manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems, 48*, ۱٥۷–۱٦۹.

Xu, L. D., He, W., & Li, S. (۲۰۱٤). Internet of Things in industries: A survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics, 10*(٤), ۲۲۳۳–۲۲٤۳.

Fernández-Caramés, T. M., & Fraga-Lamas, P. (Eds.). (۲۰۲۲). *Advances in the convergence of blockchain and artificial intelligence.* BoD–Books on Demand.

Rabah, K., & Oguta, J. (۲۰۱۷). Integrated RFID-IoT powered car parking management system for smart cities. *Mara Research Journal of Information Science & Technology, 2*(۱), ۱۰–۱٦.

Tyagi, S., Rastogi, N., Gupta, A., & Joshi, K. (۲۰۲٤). Significant leap in the industrial revolution from industry ٤,۰ to industry ٥,۰: Needs, problems, and driving forces. *Management and Production Engineering Review*, *15*.