فناوری همراه
fanavari hamrah
فصلنامه‌ی خبری تحلیلی
تابستان و پاییز ۱۴۰۲
شماره‌ی نهم
رصد فناوری

مروری بر معماری‌های مرجع اینترنت اشیاء صنعتی

اینترنت اشیاء صنعتی (IIoT) با پایش از راه دور، تحلیل هوشمند و کنترل فرآیندهای صنعتی، منجر به ایجاد تحول و ظهور انقلاب صنعتی چهام شده است. دنیای صنعت در مراحل اولیه پذیرش فناوری اینترنت اشیاء صنعتی و پیاده‌سازی راه حل‌های آن دچار چالش خواهد بود. بنابراین، نیاز به رفع چالش‌های پدیدار شده در این حوزه وجود دارد. از این رو، پژوهشگران، معماری‌های IIoT مبتنی بر لایه‌های معماری مختلف و فناوری‌های نوظهور برای یکپارچه سازی انتها به انتهای سیستم‌های IIoT را پیشنهاد داده‌اند. در این مقاله، سه معماری مرجع IIoT پذیرفته شده را به صورت مفصل مورد بررسی قرار می‌دهیم و مقایسه‌ای بین آن‌ها ارائه خواهیم داد.

کلید واژه: اینترنت اشیا، اینترنت اشیا صنعتی، انقلاب صنعتی چهارم، مدل معماری مرجع

منصوره قاسمی برسیانی

کارشناسی ارشد مهندسی فناوری اطلاعات- گرایش شبکه‌های کامپیوتری از دانشگاه علم و صنعت ایران، کارشناس مرکز تحقیق و توسعه همراه اول

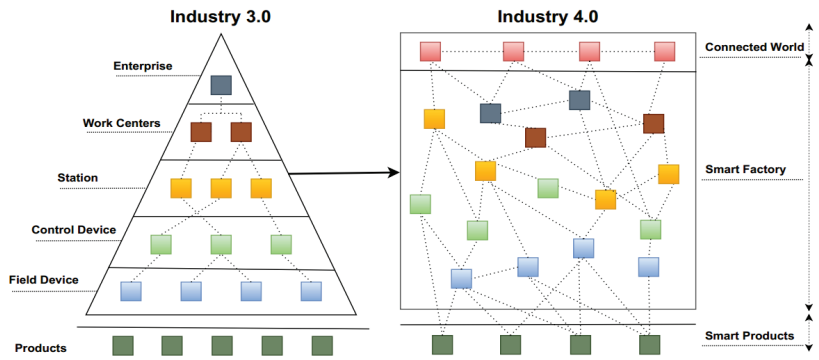
مقدمه

اینترنت اشیاء[1] با فراهم کردن اتصال بین میلیاردها دستگاه و دسترسی به آن‌ها از هر مکانی و در هر زمانی، در قرن حاضر انقلابی را به همراه داشته است. مفهوم اولیه IoT به عنوان اتصال اشیاء با اینترنت در سال ۱۹۹۹ توسط کوین آشتون مطرح شد و سازمان ITU آن را به عنوان اتصال بین افراد و اشیاء و بین اشیاء فیزیکی و مجازی برای تبادل اطلاعات جهت انجام وظایف هماهنگ شده توسعه داد. در مقایسه با اینترنت اشیاء که با اتصال برنامه های کاربردی دنیای واقعی بدون دخالت انسان به اهداف هوشمندسازی دست می یابد، اینترنت اشیاء صنعتی[2] تکامل بیشتری را در فرآیند تولید به ارمغان می آورد. IIoT با تلفیق فناوری اطلاعات[3] و فناوری عملیات[4] به صنایع کمک می کند تا کارایی عملیاتی خود را افزایش دهند. به‌علاوه، دوران جدید انقلاب صنعتی چهارم (صنعت ۴,۰) با یکپارچگی IIoT و سامانه‌های سایبر-فیزیکی[5]، جهت ایجاد مشارکت و همکاری دستگاه‌های هوشمند، تحولات جدیدی را به همراه دارد. صنعت ۴,۰ در هر یک از صنایع به‌منظور خودبهینگی، بهبود تصمیم‌گیری با استفاده از حسگرهای پیشرفته، افزایش کیفیت تولید و تعمیر و نگهداری پیش‌گیرانه[6] در جهت کاهش زمان خاموشی و از کار افتادن سامانه‌ها استفاده می‌شود. در این صنعت همچنین CPS قابلیت شبکه‌بندی، سنجش و محاسبات را با سامانه‌های فیزیکی ترکیب می‌کند تا یادگیری و انطباق این سامانه‌ها تسهیل شود. تلفیق IIoT، IoT و CPS، مولفه‌های صنعت ۴,۰ را شکل می‌دهند که در انقلاب صنعتی حال حاضر به اوج خود دست یافته است.

دیجیتالی سازی فرآیندهای صنعتی، نیازمند پیشرفت‌های فناورانه جدید است که چالش‌های بزرگی را برای یکپارچه سازی انتها به انتهای IIoT ایجاب می‌کند. برای توسعه انتها به انتهای سیستم‌های IIoT، معماری‌های مرجع مختلفی مانند IIRA[8]، RAMI 4.0[7] و OpenFog RA[9] پیشنهاد شده‌اند که شامل مجموعه‌ای از لایه‌های معماری (از حسگر تا ویژگی‌های مدیریت سازمان) هستند و راهبردی برای توسعه فراهم می‌کنند. معماری‌های IIoT موجود در منابع مختلف پژوهشی، چالش‌های خاص را در یک مورد استفاده خاص در صنعت یا کاربرد صنعت عمومی برطرف می‌کنند؛ این در حالی است که معماری‌های مرجع طرح کلی برای فرآیند توسعه بدون پروتکل و استاندارد ثابتی فراهم می‌کنند.

1- Internet of Things (IoT)
2- Industrial Internet of Things (IIoT)
3- Information Technology (IT)
4- Operational Technology (OT)
5- Cyber-Physical Systems (CPS)

6- Predictive maintenance
7- Reference Architectural Model industry 4.0
8- Industrial Internet Reference Architecture
9- OpenFog Reference Architecture



شکل ۱ - مقایسه انقلاب‌های صنعتی سوم و چهارم [۲]

در این مقاله، در بخش اول، یک بررسی دقیق از معماری‌های مرجع IIoT و جزییات آن‌ها ارائه می‌دهیم. در بخش بعدی مقاله به بررسی معماری‌های مرجع IIRA، RAMI 4.0 و OpenFog می‌پردازیم. در بخش ۳، مقایسه‌ای بین معماری‌های مرجع مذکور انجام شده است. در بخش ۴ به نتیجه‌گیری و چالش‌های IIoT اشاره شده است.

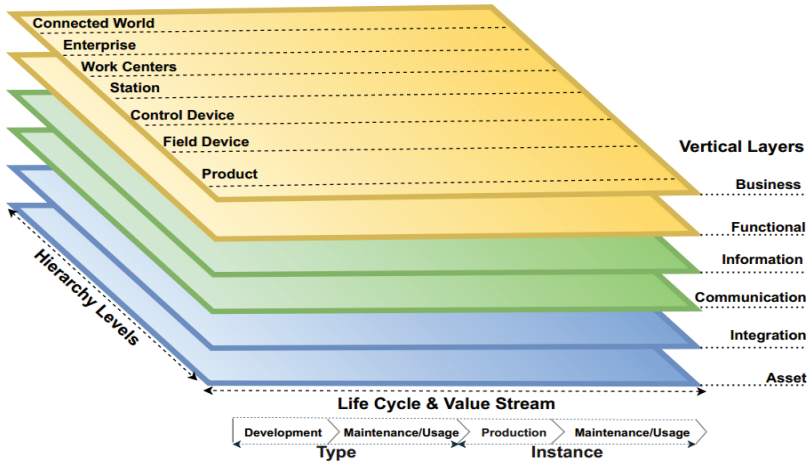
از آنجا که یکی از مفاهیم پرکاربرد مطرح شده در انقلاب صنعتی چهارم، اینترنت اشیاء صنعتی است، در ادامه مروری بر معماری‌های مرجع IIoT خواهیم داشت.

معماری‌های مرجع IIoT

معماری مرجع، یک چارچوب مشترک جهت توسعه، تجزیه و تحلیل سیستم‌ها به‌طوری که به نیازمندی‌های عملکردی پاسخ دهد، فراهم می‌کند. معماری‌های مرجع در IIoT، مستقل از فناوری‌ها و استانداردهای خاص هستند. این معماری‌ها، راهنمای ساختاری برای جنبه‌های مختلف یک سیستم، از جمله مدل شبکه استاندارد برای تعامل با دستگاه‌ها و حسگرها هستند. همچنین، خدمات معماری ابر برای ویژگی‌های نظارت و مدیریت از راه دور و اطلاعات مربوط به سخت‌افزارهایی که توسط معماری پشتیبانی می‌شوند، را فراهم می‌کنند. کارشناسان از سازمان‌های مختلف، معماری‌های مرجع را پیشنهاد داده‌اند تا ساختار لازم برای تغییر فرآیند تولید در صنایع و بر اساس فناوری‌های موجود را فراهم کنند. سه مدل از اصلی‌ترین معماری‌های مرجع IIoT شامل IIRA، RAMI 4.0 و OpenFog RA هستند که در ادامه توضیح داده شده است [۱].

۲-۱-مدل معماری مرجع انقلاب صنعتی چهارم (RAMI 4.0)

این مدل معماری مرجع به منظور به روزرسانی فرآیند تولید و اتوماسیون صنعتی در آلمان توسعه یافته است. در صنعت ۳,۰، محصولات از یکدیگر جدا هستند، عملکردها به سخت‌افزار منحصر می‌شوند و اجزای سیستم در سطوح سلسله‌مراتبی با



شکل ۲- مدل معماری RAMI 4.0 [۳]

یکدیگر تعامل دارند. براســاس اطلاعات RAMI 4.0 RA برای Industry 4.0، محصولات قسمتی از شبکه هستند، عملکردها در ساختار شبکه توزیع شده‌اند و شــرکای مختلف می‌توانند بدون توجه به سلسله‌مراتب سیســتم با یکدیگر ارتباط برقرار کنند. در شــکل ۱، RAMI 4.0 چگونگی تمایز Industry 4.0 از Industry 3.0 را نشان می‌دهد.

در RAMI 4.0، اســتانداردهای بین‌المللــی الکترونیک، برق، مکانیک و فناوری اطلاعات به صورت بین رشته‌ای در ارائه فناوری شرکت می‌کنند. این معماری بر اساس معماری سرویس گرا[۱۰] برای ارائه خدمات بین اجزای سیستم از طریق پروتکل‌های شبکه و تبدیل وظایف پیچیده به فرآیندهای ساده بر اساس فناوری‌ها و محصولات مستقل استوار است. شکل ۲ نشان‌دهنده مدل سه بعدی RAMI 4.0 RA است که بین همه شرکای صنعتی تعامل و درک متقابل را فراهم می‌کند و به آن‌ها کمک می‌کند که چگونه به صورت ساختار یافته، صنعت ۴,۰ را اجرا کنند.

۱-۱-۲- محور سطوح سلسله مراتب

سطوح سلسله مراتبی در محور افقی مدل مبتنی بر استانداردهای بین‌المللــی IEC 62264 و IEC 61512 فنــاوری اطلاعات و سیستم‌های کنترل هســتند. اصطلاحات ایستگاه، مراکز کار، ســازمان و جهان متصل در این محور که از این اســتانداردها استخراج شده‌اند برای ایجاد زمینه مشترک در بخش‌های فعلی اتوماسیون کارخانه و صنعت فرآیندی هستند. هفت سطح زیر در محور سلسله مراتب مدل RAMI 4.0 وجود دارد:

محصول: محصول نهایی تولید شده در صنعت است.

دستگاه میدان: دستگاه‌های سخت‌افزاری مانند حسگرها و محرک‌ها[۱۱] هســتند که مقادیر اطلاعات محیط را جمع‌آوری می‌کنند.

دستگاه کنترل: دستگاه‌های کنترلی مانند کنترل کننده‌های منطقی قابل برنامه‌ریزی[۱۲] و کنترل کننده‌های توزیع شــده[۱۳] (DC)، که خواندن مقادیر حسگرها را بر عهده دارند و دستورات کنترلی را به سیستم ارسال می‌کنند.

ایستگاه: محلــی است که کاربر با دسترســی مدیر سیستم، فعالیت صنعتی را نظــارت می‌کند و به فرآیندهــا و رویدادها پاسخگو است. به عنوان مثال سیستم SCADA این چنین عمل می‌کند.

مراکز کار: ذخیره داده‌ها، اطلاعات و تحلیل آن‌ها بر اســاس تاریخچه داده‌ها در این مراکز انجام می‌شود که به‌عنوان سیستم اجرایی تولید یا MES[۱۴] شناخته می‌شــوند. سیستم MES به کنترل، پایش و ردگیری تمام فرآیندهای تولید کمک می‌کند. مدیریت انبار، دارایی‌ها و ســرمایه‌های انســانی مثال‌هایی از فرآیندهایی است که سیستم اجرایی تولید به مدیریت آن کمک می‌کند. این سیستم داده‌ها را از خط تولید و هر منبع دیگری در ســازمان جمع‌آوری کرده و آن را در اختیار اپراتورها، مدیران و تصمیم‌گیران سازمان قرار می‌دهد [۴].

سازمان: سطح سازمان (ERP[۱۵]) برای مدیریت تمام اطلاعات و تصمیمات سودآور کســب و کار بکار گرفته می‌شود. سیستم برنامه‌ریزی منابع انسانی یا ERP بر مواردی نظیر تولید در مقابل سفارشــات، هزینه در برابر درآمد و مدیریت برنامه‌ریزی تولید نظارت می‌کند.

جهان متصل: سیستم به اینترنت متصل شده است تا به وسیله فرآیند زنجیره تامین، با صنایع خارجی در ارتباط باشد.

۲-۱-۲- جریان ارزش و چرخه عمر

استانداردهای فرآیند چرخه عمر مورد استفاده در اتوماسیون

10- Service Oriented Architecture (SOA)
11- Actuators
12- Programmable Logic Controller (PLC)
13- Distributed Controler (DC)
14- Manufacturing Execution System
15- Enterprise Resource Planning

HAMRAH-E-AVAL

صنعتی، کنترل و سیستم‌های اندازه گیری در محور افقی مدل RAMI 4.0 قرار دارد. این فرآیند، اطلاعات مربوط به اجزای تولید از مرحله طراحی تا محصول نهایی را نشـــان می‌دهد. فیلد نوع مربوط به مرحله طراحی و نمونه‌سازی اولیه تولید است، در حالی که فیلد نمونه مربوط به زمانی است که محصول به صورت نهایی تولید شده است.

۲-۱-۳- لایه‌های معماری مدل RAMI ۴.۰

در معماری مـــدل RAMI 4.0، لایه‌های عمـــودی که به‌عنوان لایه‌های قابلیت همکاری[16] شناخته می‌شوند، تمام فرآیندهای صنعتی (از دســـتگاه‌ها و دارایی‌های فیزیکی تا یکپارچگی بین انسان، فناوری و پروتکل‌ها) همراه با خواص عملکردی اجزای سیســـتم و فرآیندهای کســـب و کار آن‌ها را پوشش می‌دهند. پژوهشـــگران لایه‌های معماری زیر را برای مـــدل RAMI 4.0 توضیح داده‌اند:

دارایی: این لایه پایین‌ترین لایه است که تمام اجزای فیزیکی از جمله دستگاه‌ها و لوازم جانبی را شامل می‌شود.

یکپارچگی: این لایـــه اطلاعات تولید شـــده از دارایی‌ها را به لایه‌های بالاتر ارائه می‌دهد، قابلیت فرمان‌دهی و کنترل دارایی‌ها را برای لایه عملکرد فراهم می‌کند و عناصر IT مانند RFID، HMI و محرک‌ها را شامل می‌شود.

ارتباطات: این لایه مسئول حفظ ارتباط بین شبکه‌ها با استفاده از استانداردها و پروتکل‌ها و ایجاد تعامل لایه دارایی و یکپارچگی با لایه‌های بالاتر است.

اطلاعات: این لایه پیش پردازش اطلاعـــات برای رویدادهای مختلف را فراهم می‌کند، همچنین اطمینان حاصل می‌کند که صحت و کیفیت داده‌های دریافت شده از لایه‌های پایین حفظ شود و سپس داده‌های ساختار یافته را به لایه‌های عملکردی و تجاری ارائه می‌دهد.

عملکردی: لایه عملکردی داده‌ها را از لایه دارایی دریافت کرده و تصمیمات را بر اساس تحلیل داده‌ها اجرا می‌کند.

تجاری: این لایه شـــامل مدل‌های کســـب و کار ســـازمان و چارچوب‌های قانونی به همراه خدمات پایش بلادرنگ صنعتی با استفاده از داشبوردها و برنامه‌های تعامل با کاربر است.

16- Interoperability

۲-۲- معماری مرجع اینترنت صنعتی (IIRA)

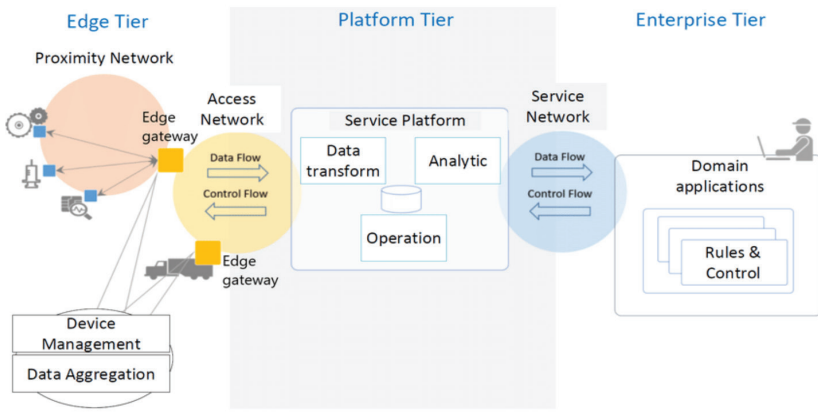
کنسرسیوم صنعتی بین المللـــی (IIC) یک مـــدل معماری فریمورک مشـــترک IIRA را بـــرای پشـــتیبانی از برنامه‌ها و استانداردهای مختلف در توسعه راه حل IIoT ارائه می‌دهد. IIRA بر اساس استانداردهای ISO/IEEE/IEC 42010 تطبیق داده شده است و می‌تواند به تغییر در سیستم‌های کنترل صنعتی به روش‌های زیر پاسخ دهد:

افزایش خودکاری[17] محلی: شامل فراهم کردن فناوری‌های جدید، قدرت محاسباتی و حسگری بهبود یافته است که دقت داده‌ها را افزایش می‌دهد و به ایجاد سیستم‌های خودکار کمک می‌کند.

افزایش بهینه‌سازی سیستم: شامل تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از یادگیری ماشین بر روی داده‌های جمع آوری شده حسگر به منظور ارائه بینش درباره سیستم پیاده‌سازی شده و در راستای بهبود سیستم‌های کنترل و بهینه‌سازی آن‌ها است.

IIRA یک معماری سه لایه شـــامل لایه لبه[18]، لایه پلتفرم[19] و لایه سازمان[20] است. گره[21]ها، دستگاه‌ها، حسگرها، سیستم‌های کنترل و دارایی‌های مختلف از طریق اتصالات سیمی و بی‌سیم به درگاه لبه[22] متصل شده و یک شـــبکه مجاورت[23] را تشکیل می‌دهند. دروازه لبه مدیریت و تجمیع دستگاه‌ها را انجام می‌دهد،

17- Autonomy
18- Edge
19- Platform
20- Enterprise
21- Node
22- Edge Gateway
23- Proximity Network



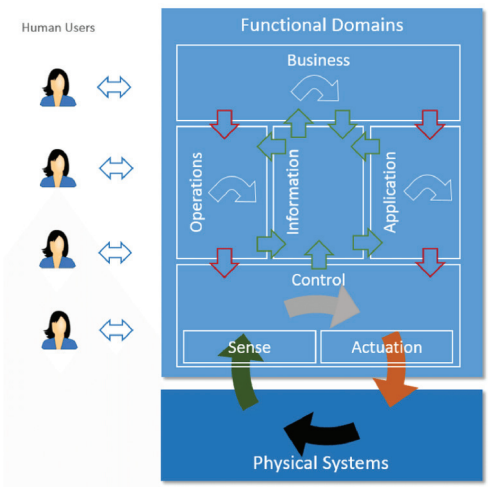
شکل ۳- مدل معماری سیستم IIoT سه لایه ای- IIRA[۵]

سپس داده‌های مربوطه را از طریق شبکه دسترسی به لایه پلتفرم ارسال می‌کند. لایه پلتفرم تبدیل داده‌ها، عملیات و تجزیه و تحلیل داده‌ها را انجام می‌دهد؛ سپس اطلاعات را از طریق شبکه خدمات به لایه سازمان ارسال می‌کند. در لایه سازمان، کاربران نظارت و کنترل را تحت نظر برنامه‌های دامنه انجام می‌دهند و دستورات کنترلی را با استفاده از فرآیند جریان کنترل[۲۴] به لایه پلتفرم ارسال می‌کنند. لایه پلتفرم سپس این اطلاعات را به لایه لبه ارسال کرده تا وظایف مربوطه را انجام دهد. شکل ۳، معماری سه لایه IIoT را نشان می‌دهد که توسط IIC ارائه شده است.

۱-۲-۲- دامنه‌های عملکردی و دیدگاه‌های عملکردی

IIRA شامل دو بخش عملکردی مهم دیدگاه عملکردی و دامنه عملکردی در معماری خود است. دیدگاه عملکردی، دیدگاه کلی از مشاهدات معماری اجزای سیستم و ساختار آن است. دامنه عملکردی شامل پنج دامنه متمایز است که سازنده‌های معماری سیستم هستند. شکل ۴ اطلاعات پردازش بین دامنه‌های عملکردی مدل IIRA را نشان می‌دهد. پیکان‌های سبز رنگ جریان داده / اطلاعات را نشان می‌دهند، پیکان‌های خاکستری / سفید جریان تصمیم را نشان می‌دهند و پیکان‌های قرمز رنگ جریان فرمان / درخواست را نشان می‌دهند.

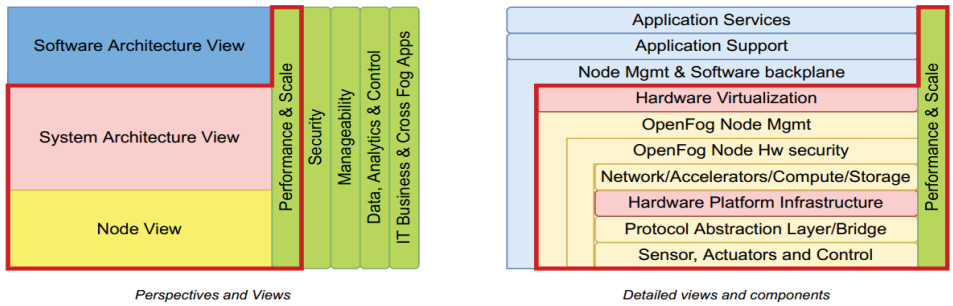
24- Control Flow



شکل ۴- دامنه‌های مدل مرجع IIRA[۵]

۲-۲-۲- دامنه‌های عملکردی

دامنه کنترل: شامل عملکردهایی برای پیاده‌سازی سیستم‌های کنترل در صنایع است. این دامنه شامل عملکردهای حسگری و محرکی است که داده‌ها را از حسگرها می‌خوانند و سیگنال‌های کنترلی را برای محرک‌ها ارسال می‌کنند. همچنین، شامل عملکرد ارتباطی است که امکان تبادل اطلاعات بین اجزای سیستم و فناوری‌ها را با استفاده از ویژگی‌های مختلف مانند API را فراهم می‌کند. دامنه کنترل با استفاده از مدل‌سازی بر روی داده‌های حسگر، رفتار و شرایط سیستم را تفسیر می‌کند.



شکل ۵- معماری مرجع OpenFog [۶]

دامنه عملیات: وظایف مدیریت و عملیات برای دامنه کنترل را انجام می‌دهد. همچنین، عملکردهای تأمین و استقرار را برای دسترسی به دارایی‌ها در مقیاس بزرگ و ردگیری، اضافه کردن، تغییر یا حذف آن‌ها بدون توجه به محیط صنعتی فراهم می‌کند.

دامنه اطلاعات: این دامنه عملکردی پردازش و جمع آوری داده‌ها را از اجزای سیستم انجام می‌دهد و تحلیل داده‌ها را برای به دست آوردن اطلاعات درباره پارامترهای سیستم و بهینه‌سازی سیستم از طریق مراحل تصمیم‌گیری انجام می‌دهد.

دامنه برنامه: دامنه برنامه شامل عملکردهای پیاده‌سازی منطق و قوانین برنامه برای بهینه‌سازی در سطح بالا است. همچنین، شامل API و UI است که با استفاده از آن، اطلاعات مربوط به تعاملات انسان یا برنامه‌های مختلف برای پردازش در دسترس است.

دامنه کسب و کار: شامل عملکردهای مختلف برای پشتیبانی از فعالیت‌ها و فرآیندهای کسب و کار و یکپارچه‌سازی آن‌ها در سیستم‌های IIoT است. نمونه‌هایی از عملکرد کسب و کار، ERP، MES، پرداخت‌ها، صورتحساب و ... هستند.

۳-۲- معماری مرجع OpenFog

این معماری به محققین، توسعه دهندگان، طراحان و صنایع کمک می‌کند تا اجزای مورد نیاز برای رایانش مه[۲۵] را ارائه دهند. OpenFog مدل معماری مبتنی بر مه[۲۶] را برای حل مسائل پیاده‌سازی صنعتی از طریق سازگاری با PaaS[۲۸]، SaaS[۲۷] و IaaS[۲۹] ارائه می‌دهد. OpenFog RA در صنایع مختلف از جمله خودروهای هوشمند و سامانه‌های کنترل ترافیک، شهرهای هوشمند، ساختمان‌های هوشمند و غیره کاربرد دارد. هدف آن ارائه امنیت، شناخت، چابکی، تأخیر کم و کارآیی است. علاوه بر این، OpenFog RA بر اساس هشت ستون اصلی شکل گرفته است که ویژگی‌های کلی مدل سیستم را برای پیاده‌سازی‌های بلادرنگ نشان می‌دهد. دیدگاه[۳۰] ویژگی‌های عرضه شده در این معماری مرجع را برجسته‌تر می‌کند، در حالی که نما[۳۱] جنبه‌های ساختاری معماری لایه‌ای را نشان می‌دهد. قسمت نما حاوی سه رویکرد صاحب نظر در معماری مرجع به‌عنوان نمای نرم‌افزار، نمای سیستم و نمای گره است. شکل ۵ مدل OpenFog RA را نشان می‌دهد. لایه‌های عمودی سبز روشن، دیدگاه معماری مرجع را نشان می‌دهند، لایه‌های زرد روشن و آبی روشن، نماهای گره و معماری نرم افزار را مشخص می‌کنند و لایه‌های قرمز روشن، نمای معماری سیستم را نشان می‌دهند.

25- Fog Computing
26- Fog as a Service (FaaS)
27- Software as a Service
28- Platform as a Service
29- Infrastructure as a Service
30- Perspective

۱-۳-۲- ستون‌های معماری رایانش مه

معماری OpenFog RA براساس هشت ستون اصلی شکل گرفته است. این ستون‌ها ویژگی‌های اصلی سیستم‌های پیاده شده با فناوری رایانش مه و معماری لایه بندی شده را نشان می‌دهند.

امنیت: امنیت معماری OpenFog نه تنها به استانداردهای خاص محدود نمی‌شود، بلکه شامل تمام مکانیزم‌های امنیتی از سطح سخت‌افزار تا سطح برنامه مبتنی بر نرم افزار است. ویژگی‌های امنیتی ارائه شده در OpenFog RA شامل حریم خصوصی و صحت داده[۳۲]، گمنامی[۳۳]، تایید[۳۴]، اندازه‌گیری[۳۵]، اعتماد[۳۶] و اعتبارسنجی کاربر و دستگاه[۳۷] هستند. مدل OpenFog RA امنیت انتها به انتها را فراهم می‌کند. علاوه بر این، پس از تأیید اطلاعات، لینک شبکه بین گره‌ها فراهم می‌شود و سپس فرآیند اعتبارسنجی صورت می‌گیرد.

قابلیت مقیاس پذیری: این مدل ویژگی‌هایی را فراهم می‌کند که گره‌های ابر، سرویس‌های ذخیره سازی و شبکه‌ها براساس نیاز کاربران مقیاس‌پذیر هستند. در OpenFog RA انواع قابلیت مقیاس‌پذیری به شرح زیر وجود دارد:

عملکرد مقیاس پذیر: شامل بهبود عملکرد مه با توجه به نیازهای برنامه با کاهش تأخیر[۳۸] در سامانه است.

31- View
32- Data privacy and integrity
33- Anonymity
34- Attestation
35- Measurement
36- Trust
37- User and device verifications
38- Latency

ظرفیت قابل مقیاس پذیر: به افزایش ظرفیت شبکه، سامانه، برنامه و کاربر کمک می کند.

قابلیت اطمینان مقیاس پذیر: این قابلیت اطمینان با استفاده از مه‌های افزونه[39] در صورت وجود خطای شبکه یا بار زیاد اطلاعات یا پردازش تأمین می‌شود.

امنیت مقیاس پذیر: شامل ویژگی‌های امنیت نرم‌افزار و سخت‌افزار اضافی است مانند فراهم کردن دسترسی و پردازش اطلاعات رمزنگاری شده هنگامی که امنیت سخت گیرانه می‌شود.

سخت‌افزار مقیاس پذیر: اجزای سخت‌افزاری اضافی را در صورت وجود نیاز بین مه‌های[40] شبکه و سامانه‌های داخلی آن‌ها، نظیر عملیات ذخیره‌سازی داده، افزایش مقیاس شبکه‌های سیمی و بی سیم و بالابردن مقیاس فرآیندهای محاسباتی فراهم می کند.

باز بودن[41]: این ستون از محیطی متنوع پشتیبانی می کند که گره‌های مه و دستگاه‌های یک شبکه تعامل‌پذیر با حذف تأثیرات منفی حاصل از کیفیت و هزینه وجود یک تک فروشنده[42] را تشکیل داده و بدون توجه به مکان، قابلیت تعامل بین اجزاء را فراهم می کند.

خودمختاری[43]: ساختار خودمختاری، با فراهم کردن تسهیلات تصمیم گیری نزدیک دستگاه‌ها، از پردازش متمرکز جلوگیری می کند و کارآمدی در عملکرد، امنیت و هزینه را به ارمغان می‌آورد. این قابلیت با فعال سازی گزینه کشف شبکه[44] به دستگاه‌ها کمک می کند تا در صورت بروز مشکلات در uplink، فعال بمانند.

قابلیت برنامه‌ریزی: برنامه‌ریزی گره‌ها و سیستم‌های پیاده شده در لایه‌های سخت‌افزاری و نرم‌افزاری با قابلیت تغییر وظیفه گره‌های مه فراهم شده است. برنامه‌ریزی امنیت بهینه شده را با به‌روز رسانی خودکار پچ امنیتی، همراه با زیرساخت قابل تطبیق و چندین مستأجر فراهم می کند.

قابلیت اعتماد، در دسترس بودن و خدمات پذیری[45]: در حالی که قابلیت اعتماد، اطمینان حاصل می کند که گره‌های ابر و اجزای کلی سیستم به شرایط داده شده برای ارائه عملکرد خود کار می کنند، قابلیت در دسترس بودن به مدیریت و پشتیبانی مستمر بک اند[46]، از جمله دسترسی افزونه[47] و امن دستگاه‌ها و پیکربندی‌های افزونه اشاره دارد. خدمات پذیری نصب، به‌روز رسانی و نگهداری خودکار گره‌های مه را با پشتیبانی از قطعات سخت افزاری قابل تعویض فراهم می کند.

چابکی: این ستون مسئول مدیریت تغییرات در سیستم و ارائه بینش‌های تحلیلی از داده‌های گسترده دریافت شده از حسگرها برای انجام تصمیمات کارآمد کسب و کار است.

سلسله مراتب: با توجه به اینکه همه سیستم‌ها در OpenFog RA سلسله مراتبی نیستند، این ستون اطلاعات سلسله مراتب مکمل و سنتی را برای سیستم‌های شرکت فراهم می کند.

۲-۳-۲- دیدگاه‌ها

دیدگاه‌های نشان داده شده در ستون‌های سبز عمودی در شکل ۵ به شرح زیر است:

کارایی و مقیاس: عملکرد سیستم‌های پیاده شده تحت مراقبت مداوم برای کیفیت خدمات (QoS) و کمترین تأخیر با استفاده از شبکه‌های حساس به زمان و محاسبات بحرانی[48] است. اندازه‌گیری گذردهی[49] و تأخیر گره مه، کارایی رایانش مه را تعیین می کند که با نزدیک کردن رایانش مه به لبه، بهبود می‌یابد. فناوری‌های جدید مجازی‌سازی و کانتینرسازی در رایانش مه، قابلیت مقیاس‌پذیری و جداسازی گره‌ها را بهبود می‌بخشند. این فناوری‌ها همچنین می‌توانند ترافیک شبکه و تخصیص منابع بر اساس اولویت را انجام دهند.

39- Redundant fogs
40- Fogs
41- Openness
42- Single Vendor
43- Autonomy
44- Network discovery

45- Reliability, Availability, and Serviceability (RAS)
46- Back-end
47- Redundant
48- Critical computing
49- Throughput

امنیت: معماری مه تا زمانی که اعتماد بین اجزای سیستم وجود ندارد، امن نیست. سخت افزار گره ابر با اقدامات مناسب امن است و امنیت کامل داده و صحت آن از سطح پایین سخت افزار تا سطح نرم افزار با رمزگذاری امنیت انتها به انتها تضمین می‌شود. دیدگاه امنیت همچنین شامل ویژگی‌های شناسایی تهدید و حفظ حریم خصوصی است.

قابلیت مدیریت: دیدگاه قابلیت مدیریت، قابلیت پاسخگویی و تصمیم‌گیری مشابه با انسان را با کمک الگوریتم‌های ماشین فراهم می‌کند. این دیدگاه، عملکردهای مدیریت کارآمد را برای طیف گسترده‌ای از اقدامات[50] در مقایسه با سامانه‌های فناوری اطلاعات و فناوری عملیاتی سنتی فراهم می‌کند. علاوه بر این، تمام عملکردهای مدیریت، از جمله سامانه هشداردهی، عملکردهای عملیات و نگهداری، کشف دستگاه‌ها و گره‌ها و غیره را پوشش می‌دهد.

داده، تجزیه و تحلیل و کنترل: با تولید داده‌های زیاد در صنایع برای انجام تجزیه و تحلیل جهت تصمیم‌گیری، روش‌های تجزیه و تحلیل سنتی برای نیازهای رو به رشد مناسب نیست. علاوه بر این، با حرکت شرکت‌ها به سمت تعمیر و نگهداری پیشگیرانه با پایش پارامترهای سامانه، برآورده کردن نیازهای سخت گیرانه مشکل به نظر می‌رسد. رایانش مه با انجام تجزیه و تحلیل داده‌ها در لبه نزدیک منبع برای تجزیه و تحلیل خاص و ارسال اطلاعات مربوط به خدمات ابر برای عملکردهای کسب و کار و پردازش‌های مربوط به کسب و کار، به دست آوردن این اهداف را ممکن می‌کند.

ارتباط برنامه‌های کاربردی مه و کسب و کار IT: این دیدگاه اشاره به این موضوع دارد که برنامه‌های مه باید در هر سطح سلسله مراتبی عمل کرده و داده‌ها را با گره‌های دیگر به اشتراک بگذارند تا تعامل داده‌ها را به منظور حداکثرسازی ارزش‌ها از دیدگاه کسب و کار IT در محیط‌های چند تامین کننده‌ای فراهم آورد.

۳-۳-۲- نمای گره

این نما، پایین‌ترین سطح نماهای استفاده شده در OpenFog RA است. لایه‌های زرد روشن در شکل ۵ جنبه‌های نمای گره معماری را نشان می‌دهند. این جنبه‌ها باید قبل از اضافه کردن یک گره به شبکه رایانش مه مورد توجه قرار گیرند.

امنیت گره: امنیت گره، الزامات امنیتی لایه افقی و عمودی را نشان می‌دهد زیرا امنیت سیستم از سطح سیلیکون تا سطح نرم افزاری بسیار حائز اهمیت است.

مدیریت گره: این جنبه فرآیند مدیریت سیستم را با فعال کردن رابط‌های مدیریت از گره‌ها پشتیبانی می‌کند. این رابط‌ها پشتیبانی از نظارت و کنترل گره‌های سطح پایین را توسط سیستم‌های مدیریت سطح بالا انجام می‌دهند.

50- Actions

شبکه: بخش شبکه، گره‌ها را قادر می‌سازد تا براساس شبکه‌های حساس به زمان و آگاه به زمان، با یکدیگر ارتباط برقرار کرده و اطلاعات را در شبکه به اشتراک بگذارند.

شتاب دهنده‌ها: شتاب دهنده‌های استفاده شده در برنامه‌های کاربردی مه، توان و تأخیر ارتباطات را بسته به سناریو شبکه بهبود می‌بخشند.

محاسبات: گره‌های ابر، نرم افزار منبع باز را در سطح گره خود برای محاسبات پایه و تعامل بین دیگر گره‌ها و اجزای سیستم اجرا می‌کنند.

ذخیره‌سازی: اگرچه نیاز به ذخیره داده قبل از یادگیری یا انجام تجزیه و تحلیل وجود دارد، یک دستگاه ذخیره‌سازی قابل اعتماد لازم است که با نیازمندی‌های صحت داده و شرایط سلامت دستگاه ذخیره‌سازی آگاه باشد.

حسگرها، عملگرها و کنترل: این عناصر، عناصر پایین‌ترین سطح معماری یک سیستم IoT هستند. در حالی که بعضی از این دستگاه‌ها قابلیت پردازش دارند، بعضی دیگر ناتوان در پردازش داده هستند. این عناصر با استفاده از اتصال سیمی یا بی‌سیم به سیستم متصل می‌شوند.

لایه انتزاعی پروتکل: این لایه وظیفه ارتباط سنسورها و محرک‌ها با گره مه را برای انجام تجزیه و تحلیل داده‌ها دارد. همچنین اطمینان حاصل می‌کند که قابلیت همکاری بین محصولات چند تامین کننده برای بهینه‌سازی داده لایه‌های متقابل[51] وجود دارد.

۴-۳-۲- نمای معماری سیستم

نمای معماری سیستم شامل چندین نمای گره برای پیاده‌سازی‌های مه مقیاس‌پذیر است. این دیدگاه به مسائل تیم‌های فنی، تولیدکنندگان و معماران سیستم پرداخته است. لایه عمودی عملکرد و مقیاس و برخی لایه‌های افقی که زیر خط مرزی قرمزرنگ در شکل ۵ قرار دارند، دیدگاه معماری سیستم OpenFog RA را مشخص می‌کنند.

زیرساخت پلتفرم سخت‌افزاری: این دیدگاه نیازمندی‌های پلتفرم مه را برای اطمینان از ایمنی افراد و سخت‌افزار در برابر هر گونه خطر، حفاظت سیستم در برابر محیط و پشتیبانی مکانیکی زیرساخت سخت‌افزار کلی معرفی می‌کند. سیستم پیاده شده همچنین باید استانداردهای تطابق و تنظیمات را رعایت کند.

مجازی‌سازی سخت‌افزار و کانتینرها: مجازی‌سازی سخت افزار، امکان به اشتراک گذاری چندین موجودیت را بر روی یک دستگاه فیزیکی فراهم می‌کند و با محدود کردن بخش‌های خاص سیستم از ماشین‌های مجازی، امنیت سیستم را تضمین می‌کند. استفاده از کانتینرها، هزینه‌های اضافی را کاهش داده و مکانیسم‌های سبک وزن[52] را در محیط رایانش مه فراهم می‌کند.

51- Cross layer
52- Lightweight

دسته بندی / ویژگی	RAMI 4.0	IIRA	OpenFog RA
سازمان ارائه دهنده مدل معماری	انجمن صنایع برق و الکترونیک آلمان (ZVEI)	کنسرسیوم صنعتی بین المللی (IIC)	کارگروه معماری OpenFog
لایه‌ها	تجاری، عملکردی، اطلاعاتی، ارتباطی، یکپارچه‌سازی و دارایی	تجاری، مصرف، عملکرد و پیاده‌سازی	شامل و نه محدود به دیدگاه عملکرد و توسعه
سلسله مراتب	محصول، میدان، دستگاه،کنترل دستگاه، ایستگاه، مراکز کاری و سازمان	غیر سلسله مراتبی	دستگاه‌ها، پایش و کنترل، پشتیبانی عملیاتی، پشتیبانی تجاری و سیستم‌های سازمانی
تفاوت در کاربردهای صنعتی	تمرکز بر تولید هوشمندانه اشیا از طریق فرآیند چرخه عمر محصول	فرآیند تولید را پوشش می‌دهد اما چرخه عمر محصول را کامل نمی‌کند. کارها را قادر می‌سازد تا با تعامل سیستم‌های بزرگ مستقر شده هوشمندانه کار کنند.	تمرکز بر پلتفرم عمومی برای کاربرد با هرگونه مطالعه موردی استفاده از بازار عمودی. به عنوان مثال، کشاورزی، شهرهای هوشمند، حمل و نقل و غیره.
درگاه[1]، لبه یا مه	تجزیه و تحلیل داده‌ها و اتصال سخت افزار و ابر در درگاه	محاسبات، پردازش و ذخیره سازی در لبه	قابلیت های ذخیره سازی، پردازش، محاسبات، شتاب‌دهنده‌ها و شبکه برای کاربرد عمودی در هر مه

1- Gateway

جدول ۱ - مقایسه معماری‌های مرجع IIoT [۱]

۵-۳-۲- نمای معماری نرم افزار

این دیدگاه شامل دیدگاه معماری نرم‌افزاری است که در یک پلتفرم اجرا می‌شود. پلتفرم با ترکیب دیدگاه‌های گره برای پردازش سناریوهای خاص شکل می‌گیرد. نرم‌افزار گره‌های ابری در سه لایه جداسازی شده است که در لایه‌های آبی روشن در شکل ۵ نشان داده شده است.

خدمات برنامه کاربردی: این لایه به کمک لایه‌های دیگر خدماتی را فراهم می‌کند تا مورد استفاده قرار گیرد و نیازهای خاص را برآورده کند.

پشتیبانی برنامه: این قسمت نرم‌افزاری زیرساخت، هیچ خدمات جدیدی انجام نمی‌دهد، اما برنامه‌های کاربردی دیگر را در اجرای وظایف خاص، پشتیبانی می‌کند.

مدیریت گره و پشتیبان نرم افزار: این لایه مدیریت گره را انجام می‌دهد و ارتباط بین گره‌ها را برقرار می‌کند.

مقایسه مدل‌های معماری مرجع IIoT

معماری‌های مرجع ارائه شده توسط سازمان‌های مختلف رویکردهای متفاوتی را برای توسعه و پیاده‌سازی IoT صنعتی دارند. در حالی که RAMI 4.0 درباره فرآیند صنعت از سطح تولید تا سطح شرکت است، IIRA درباره فرآیند صنعتی با ارتباط بین سیستم‌های پیاده‌شده است. Platform Industrie 4.0 و IIC در حال حاضر در حال همکاری برای ارائه یک معماری مرجع مشترک با ترسیم RAMI 4.0 و IIRA هستند. در حالی که RAMI 4.0 با استفاده از یک درگاه، ارتباط بین سخت‌افزار و نرم‌افزار را برقرار می‌کند، IIRA لایه Edge را برای محاسبه و ذخیره داده‌ها فراهم می‌کند. OpenFog RA درباره موارد استفاده تولید و پردازش داده بالا در برنامه‌های صنعتی است. معماری مرجع OpenFog برای پیاده‌سازی در هر برنامه‌ی یکپارچه‌سازی عمودی در صنعت طراحی شده است. انتخاب یک معماری مرجع خاص به نیازهای سیستم پیاده‌سازی شده بستگی دارد. جدول ۱ مقایسه معماری‌های مرجع IIoT را نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

از آنجا که ظهور IIoT بر اساس یکپارچگی فناوری اطلاعات و فناوری عملیاتی اتفاق افتاده است، مشکلات ناشی از این یکپارچگی نیز باید با کمک فناوری‌های جدید حل شوند. اگرچه مدل‌های معماری مرجع مانند IIRA، RAMI 4.0 و OpenFog، یک ساختار و راهنمای طرح اولیه برای برنامه‌های کاربردی IIoT را فراهم می‌کنند؛ با این حال، به دلیل مشکلات ناشی از فناوری‌های متنوع و استفاده‌های صنعتی گوناگون، حل چالش‌های پیش روی IIoT با دنبال کردن معماری‌های مرجع، مشکل به نظر می‌رسد. در این رابطه، استفاده از فناوری‌های جدیدی مانند رایانش لبه/مه، شبکه‌های نرم‌افزار محور، نسل پنجم موبایل، یادگیری ماشین و ...، به همراه پشتیبانی از معماری‌های

HAMRAH-E-AVAL