

سکویهای اینترنت اشیا: راهکاری برای مدیریت متمرکز دستگاههای متصل

امیرمهدی حسینی منزه^۱

^۱ استادیار، دانشکده مهندسی کامپیوتر، دانشگاه علم و صنعت ایران تهران، ایران

monazzah@iust.ac.ir

چکیده

فناوری، موتور قدرتمند ایجاد تغییر است و اینترنت اشیا ستون فقرات این موتور انقلابی است. در دنیای واقعی، اشیائی که دارای حسگر و اتصال به اینترنت هستند، زمینه‌ساز به وجود آمدن مفهومی به نام اینترنت اشیا شده‌اند. داده‌ها ارزشمندترین دارایی هستند؛ بنابراین، حفظ امنیت این دارایی ارزشمند از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. بعد از معرفی اینترنت اشیا در سال ۱۹۹۹، با توجه به رشد زیاد دستگاههای متصل به شبکه اینترنت اشیا و به علت حجم انبوه داده تولید شده توسط دستگاهها، وجود سامانه‌های مدیریت متمرکز برای کنترل یکپارچه و کارآمد این دستگاهها و نظارت بر داده‌های آنها امری ضروری است. در این پژوهش بعد از معرفی جامع معماری سکویهای اینترنت اشیا، به عنوان زیرساخت‌های قدرتمند سامانه‌های اینترنت اشیا، به بررسی پژوهش‌های انجام شده در این حوزه می‌پردازیم. سپس در ادامه به منظور انجام مشاهدات آزمایش‌هایی را تحت سناریوهای مختلف بر روی سه سکوی اینترنت اشیا انجام می‌دهیم. این آزمایش‌ها باهدف بررسی کیفیت عملکرد و قابلیت اطمینان سکویهای اینترنت اشیا در آزمایشگاه سامانه‌های سایبر-فیزیکی دانشگاه علم و صنعت ایران انجام شده‌اند.

:

کلمات کلیدی: اینترنت اشیا، سکویهای اینترنت اشیا، تأخیر، قابلیت اطمینان

۱ مقدمه

تعداد دستگاه‌های اینترنت اشیا را نسبت به دستگاههای الکترونیکی جدا از اینترنت اشیا نشان داده است.

با توجه به رشد سریع در تعداد دستگاههای اینترنت اشیا متصل به شبکه، سازمان‌های استانداردسازی بین‌المللی نیز وظیفه استانداردسازی پروتکل‌های جدید را برای این فناوری به عهده گرفته‌اند [۶]. این پروتکل‌ها به منظور ارتقاء امنیت، توانایی اتصال دستگاهها و پاسخگویی به نیازها و برنامه‌های جدید اینترنت اشیا توسعه یافته‌اند. این پروتکل‌های استانداردسازی شده باعث ایجاد تطابق و هماهنگی در اتصال و مدیریت دستگاهها در اینترنت اشیا می‌شوند [۷]. جدول ۱ پروتکل‌های مطرح اینترنت اشیا در لایه‌های مختلف شبکه را نشان می‌دهد.

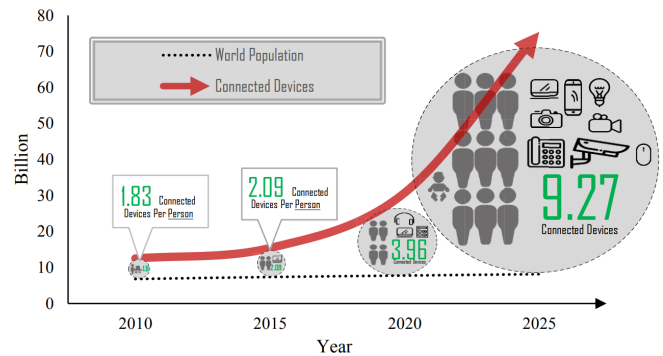
به دلیل تعداد زیاد دستگاههایی که به یکدیگر متصل هستند و باتوجه به حجم داده‌های تولید شده، نیاز به یک سامانه مدیریت متمرکز احساس می‌شود تا بتواند کنترل و نظارت بر این دستگاهها را به صورت یکپارچه و کارا انجام دهد. مدیریت متمرکز دستگاههای متصل به یکدیگر در

اینترنت اشیا^۱ در سال ۱۹۹۹ توسط کوین اشتون معرفی شد [۱]. اینترنت اشیا به مجموعه‌ای از دستگاهها و سامانه‌هایی^۲ گفته می‌شود که به شبکه‌های اینترنتی متصل شده و با یکدیگر بدون دخالت انسان، ارتباط برقرار می‌کنند [۲]. مؤسسه جهانی McKinsey پیش‌بینی انجام داده است که نشان می‌دهد تأثیر مالی بازار اینترنت اشیا بر اقتصاد جهانی تا سال ۲۰۲۵ می‌تواند به میزان ۱۱.۱ تریلیون دلار برسد [۳]. این موضوع به این معناست که ضمن گسترش اجتناب ناپذیر اینترنت اشیا و اتصال دستگاهها به شبکه، یک فرصت عظیم برای افزایش تولید و کسب درآمد به وجود آمده است.

تعداد کل دستگاههای هوشمند^۳ متصل به شبکه در سرتاسر جهان به سرعت در حال افزایش است. طبق آمار، تا سال ۲۰۱۷ بیش از ۲۰/۳ میلیارد دستگاه متصل به شبکه وجود داشت و این تعداد تا پایان سال ۲۰۲۵ به بیش از ۷۵ میلیارد دستگاه افزایش خواهد یافت [۴]، [۵]. شکل ۱ این موضوع را به تصویر کشیده است و همچنین شکل ۲ افزایش

جدول ۱: پروتکل های اینترنت اشیا در لایه های مختلف

Application Protocol		DDS	CoAP	AMQP	MQTT	MQTT-SN	XMPP	HTTP REST
Infrastructure Protocols	Routing Protocol	RPL						
	Network Layer	6LoWPAN				IPv4 / IPv6		
	Link Layer	IEEE 802.15.4						
	Physical Layer	LTE-A	IEEE 802.15.6			Z-Wave		
Influential Protocols		IEEE 1888.3,IPSec				IEEE 1905.1		



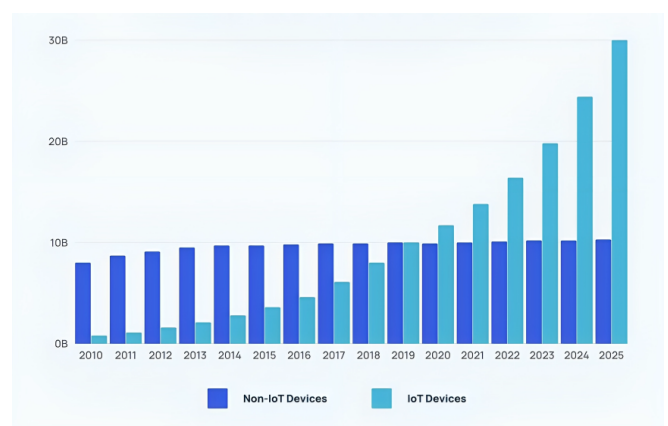
شکل ۱: تخمین تعداد دستگاه های متصل به هر شخص تا سال ۲۰۲۵ [۶]

نظیر سامانه های مراقبت سلامت یا صنایع، قابل اطمینان بودن داده ها و اطلاعات امری حیاتی است. از آنجایی که برخی از این کاربردها نیازمند تصمیم گیری سریع و به موقع هستند، هر نقص در این زمینه ممکن است عواقب جدی در پی داشته باشد. همچنین در برخی از کاربردهای اینترنت اشیا همچون خودروهای هوشمند، تأخیر در انتقال داده ممکن است باعث ایجاد حوادث جبران ناپذیری شود. به طور کلی، قابلیت اطمینان و کاهش تأخیر در سامانه های اینترنت اشیا ازجمله موارد حیاتی برای ارتقاء کارایی، ایمنی و کاربردی بودن این فناوری محسوب می شوند. از این رو، در این پژوهش قابلیت اطمینان و تأخیر دو سکوی اینترنت اشیا را تحت سناریوهای مختلف باهم مقایسه کرده ایم.

در ادامه ساختار این پژوهش به شرح زیر ساماندهی شده است: در بخش ۲ به بررسی معماری های مرسوم اینترنت اشیا پرداخته شده و مقایسه ای در بین آن ها صورت گرفته است. معرفی سکوهای اینترنت اشیا، مزایا و معایب آن ها در بخش ۳ ارائه شده است. در بخش ۴ معماری انواع سکوهای اینترنت اشیا زیر ذره بین قرار گرفته و باهم مقایسه شده اند. در بخش ۵ قابلیت اطمینان و تأخیر دو سکوی اینترنت اشیا مورد بررسی و آزمایش قرار گرفته و در نهایت، نتیجه گیری و کارهای آتی در بخش ۶ آورده شده است.

۲ معماری اینترنت اشیا

در سال های اخیر اینترنت اشیا، رشد قابل توجهی داشته است. با توجه به نیاز ذاتی دستگاه های اینترنت اشیا برای جمع آوری و تحلیل داده ها، هدف اصلی زیرساخت^۵ اینترنت اشیا، برقراری ارتباط مؤثر و قابل اعتماد بین اشیا با استفاده از انواع مختلف پروتکل ها و مؤلفه ها است. به منظور اتصال میلیاردها دستگاه هوشمند به اینترنت، نیاز به یک معماری چندلایه انعطاف پذیر برای زیرساخت این تجهیزات احساس می شود. همان طور که در مقدمه نیز بیان شد، اینترنت اشیا، شبکه ای از دستگاه های هوشمند است که با یکدیگر ارتباط برقرار می کنند و اطلاعات خود را به اشتراک می گذارند. اینترنت اشیا نه تنها در صنعت بلکه در زندگی روزمره افراد نیز کاربردهای بسیاری پیدا کرده است. از زیرساخت خانه هوشمند تا شهر هوشمند، فرصت های بسیاری برای

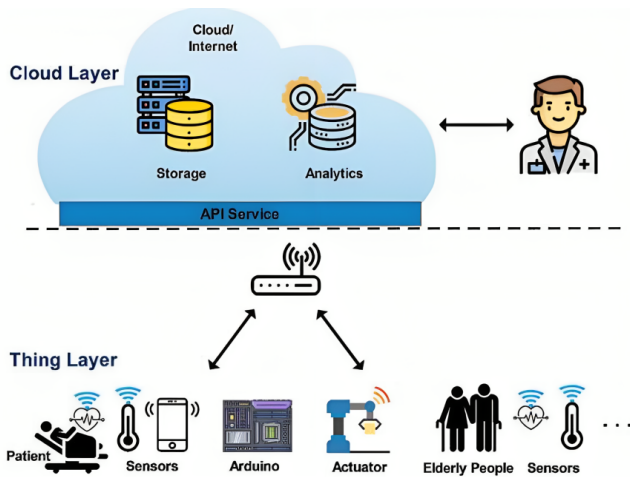


شکل ۲: تعداد دستگاه های اینترنت اشیا نسبت به دستگاه های الکترونیکی فاقد اینترنت اشیا

اینترنت اشیا بسیار حیاتی است؛ چرا که می تواند میزان انعطاف پذیری و کارایی کل شبکه را افزایش دهد. با استفاده از یک سامانه مدیریت متمرکز، می توان پاسخگویی به خطاها و مشکلات را سریع تر و بهتر انجام داد. همچنین، این سامانه ها به کاربران امکان می دهند تا در کسری از زمان به صورت بی درنگ^۴ وضعیت دستگاه ها را مشاهده، بررسی و کنترل کنند. دستگاه های اینترنت اشیا به دلیل تعدد بیشتر در معرض آسیب پذیری های امنیتی بیشتری نسبت به دستگاه های سنتی هستند. یکی از چالش های اصلی در زمینه مدیریت متمرکز دستگاه های متصل به یکدیگر در اینترنت اشیا تضمین امنیت و حفظ حریم خصوصی کاربران است. به دلیل اینکه این دستگاه ها در بستر اینترنت قرار دارند، امکان سوء استفاده از داده ها و اطلاعات کاربران وجود دارد؛ بنابراین، باید راه حل هایی برای حفظ امنیت و حریم خصوصی کاربران در نظر گرفته شود [۸]. اینترنت اشیا به عنوان یک رویکرد مهم در حوزه فناوری اطلاعات و ارتباطات با وجود اتصال اشیا فیزیکی به شبکه ها، نیازمندی هایی همچون قابلیت اطمینان و کاهش تأخیر دارد. قابلیت اطمینان در یک سامانه کامپیوتری به احتمال عملکرد بدون مشکل در یک بازه زمانی خاص اشاره دارد. در برخی از کاربردهای اینترنت اشیا

بهره‌برداری از این فناوری وجود دارد.

۱-۲ معماری مفهومی اینترنت اشیاء



شکل ۳: معماری دو لایه اینترنت اشیاء

۲-۲ معماری دو لایه اینترنت اشیاء

در دهه‌های اخیر، پیشرفت فناوری اطلاعات و ارتباطات به تغییرات چشمگیری در زیرساخت محاسبات جهانی منجر شده است. یکی از تحولات مهم در این زمینه، پیدایش رایانش ابری است. رایانش ابری به سازمان‌ها و افراد این امکان را می‌دهد تا از منابع محاسباتی مورد نیاز خود به صورت مجازی و از راه دور بهره ببرند [۹]. این تحول که به عنوان یک زیرساخت قدرتمند و انعطاف‌پذیر شناخته می‌شود ویژگی‌های مهمی مانند مقیاس‌پذیری، تخصیص منابع بر اساس نیاز و خدمات گوناگون را فراهم می‌کند. شکل ۳ معماری دو لایه اینترنت اشیاء را نشان می‌دهد. در ادامه به معرفی جزئی‌تر این معماری می‌پردازیم و لایه ابر و لایه اینترنت اشیاء را به عنوان دو رکن اصلی این معماری توضیح می‌دهیم.

۱-۲-۲ لایه ابر

لایه بالایی معماری دولایه اینترنت اشیاء شامل مراکز داده ابری^۹ است که شامل مجموعه‌ای از سرورهای ابری هستند. از جمله وظایف مهم این لایه می‌توان به نگهداری و مدیریت تجهیزات محاسباتی، ذخیره‌سازی اطلاعات و تجزیه و تحلیل اطلاعات دریافتی کاربران اشاره کرد [۹].

۲-۲-۲ لایه اینترنت اشیاء

لایه پایینی معماری دولایه اینترنت اشیاء شامل دستگاه‌های اینترنت اشیاء از جمله حسگرها^{۱۰} و دستگاه‌های کنترل‌شونده^{۱۱} است. دستگاه‌ها در این لایه وظیفه جمع‌آوری داده‌های مربوط به محیط پیرامون، ارسال داده جمع‌آوری‌شده به لایه بالایی جهت پردازش و ذخیره‌سازی و دریافت اطلاعات از لایه بالایی جهت انجام عملیات بر روی محیط را دارند. این لایه نزدیک‌ترین فاصله به کاربران نهایی را دارد.

معماری مفهومی اینترنت اشیاء یک ساختار مبتنی بر ارتباطات و اطلاعات است که به اشیاء فیزیکی قدرت اتصال به اینترنت و تبادل داده‌ها را می‌دهد. در برخی از پژوهش‌ها بیان شده است که تعداد زیادی از معماری‌های پیشنهادی موجود هنوز به یک مدل استاندارد همگرا نشده‌اند در نتیجه تاکنون معماری استاندارد برای اینترنت اشیاء نیز ارائه نشده است. موضوع قابل توجه این است که سه لایه اصلی در تمام معماری‌های ارائه شده یعنی لایه اشیاء^۶، لایه شبکه^۷ و لایه برنامه^۸ مشترک هستند؛ در واقع، معماری‌هایی با جزئیات بیشتر تنها این سه لایه را به زیرلایه‌های بیشتری گسترش داده‌اند تا دقت بیشتری ارائه دهند [۶]. جدول ۲ معماری مفهومی اینترنت اشیاء را نمایش می‌دهد. همان طور که در جدول ۲ قابل مشاهده است، لایه اشیاء شامل حسگرها و دستگاه‌هایی با تجهیزات هوشمند هستند که قابلیت اتصال به اینترنت را دارند. وظیفه این لایه ارسال و دریافت داده‌ها بین اشیاء و شبکه است. این داده‌ها ممکن است شامل اطلاعاتی از حسگرها، وضعیت دستگاه‌ها و غیره باشند. لایه شبکه مسئول اتصال و ارتباط بین اشیاء مختلف است. این لایه شامل پروتکل‌ها، استانداردها و فناوری‌های مختلفی است که ارتباطات بین اشیاء را فراهم می‌کنند. همچنین این لایه به عنوان واسطه بین لایه اشیاء و لایه برنامه عمل می‌کند و مسئول ارسال داده‌ها از اشیاء به لایه برنامه و بالعکس است. از پروتکل‌های متداول در این لایه می‌توان به MQTT، CoAP و HTTP اشاره کرد. در انتها، لایه برنامه مربوط به نرم‌افزارها و سرویس‌هایی است که بر روی داده‌های دریافتی از اشیاء عمل می‌کنند. این لایه شامل برنامه‌های کاربردی مختلف، سکوها ابری، سرویس‌های ویژه اینترنت اشیاء و غیره است. همچنین از جمله وظایف مهم این لایه می‌توان به پردازش داده‌ها، تحلیل اطلاعات، ارسال دستورات به اشیاء و ارتباط با کاربران یا سامانه‌های دیگر اشاره کرد. این لایه‌ها در کنار یکدیگر عمل می‌کنند تا امکان اتصال و مدیریت اشیاء مختلف در اینترنت اشیاء را فراهم کنند.

جدول ۲: معماری مفهومی اینترنت اشیاء

Application Layer	Operating Systems	Contiki		Tiny OS	Riot OS	Lite OS		Android	
	Services	Smart City - Building - Transport - Traffic		Environment - Natural Resources - Disaster	Law	Health Care		Industrial	Power Grid
	Protocols	MQTT		CoAP	XMPP	AMQP		DDS	
Network Layer	Routing Protocol	Routing Protocol for Low Power and Lossy Networks (RPL)							
	Network Protocol	6LoWPAN				IPv6			
	Link Related Technology	IEEE 802.15.4							
Objects Layer (Perception)	Sensors and Actuators	Arduino	Raspberry Pi	ESP8266	Beaglebone Black		Intel Edison	Telos B	
	Physical Layer Protocols	Zigbee		EPCglobal	IEEE 802.15.4		Z-Wave	BLE	
	Device Communication Technologies	RFID		GSM	Infrared	UMTS		LTE-A	5G

وظایف^{۱۹} کاربردهای بی‌درنگ به‌ویژه برای برنامه‌های حساس به تأخیر ازجمله سامانه‌های مراقبت سلامت مناسب هستند. به‌علاوه، در مقایسه با محاسبات ابری، محاسبات مه بر معماری غیرمتمرکز^{۲۰} تکیه دارد و گره‌های مه در این معماری خدمات توزیع شده^{۲۱} را فراهم می‌کنند، این مهم باعث تحمل‌پذیری خطای^{۲۲} بالاتر سامانه می‌شود [۹]. البته قابلیت‌های عملکرد محاسباتی و ذخیره‌سازی محدود از جمله چالش‌های اساسی محاسبات مه است که باید جهت رفع آن تلاش کرد.

۴-۲ مولفه‌های اصلی اینترنت اشیاء

اینترنت اشیاء از اجزا و مولفه‌های اصلی متفاوتی تشکیل شده است که این مؤلفه‌ها به‌عنوان ستون‌های اساسی برای ایجاد شبکه‌های اشیاء متصل شده به اینترنت عمل می‌کنند و امکان بهره‌برداری از امکانات هوشمند و همچنین تحلیل داده‌ها در مقیاس بزرگ را فراهم می‌آورند. در جدول ۳ مولفه‌های اصلی اینترنت اشیاء رسم شده‌اند. در ادامه قصد داریم هر مولفه را به تفصیل معرفی و بررسی کنیم.

جدول ۳: مولفه‌های اینترنت اشیاء همراه با ذکر مثال [۲]

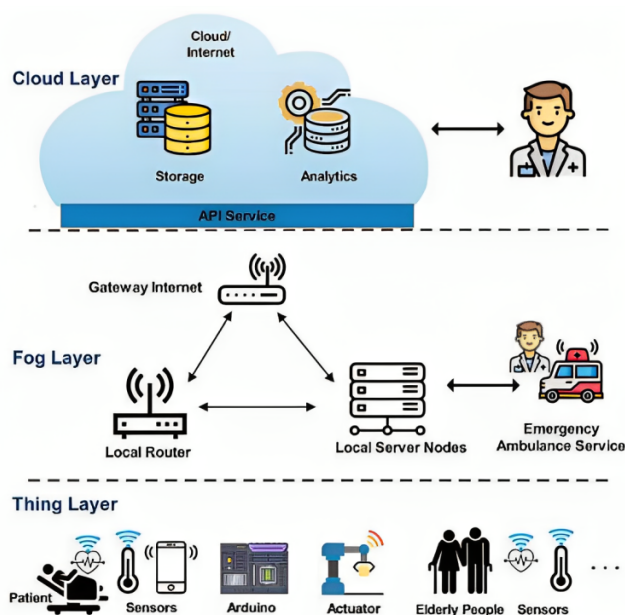
IoT Elements		Samples
Identification	Naming	EPC,uCode
	Addressing	IPv4,IPv6
Sensing		Smart Sensor, RFID tag, Actuator, Wearable Sensing Devices
Communication		RFID, NFC, UWB, Bluetooth, Z-Wave
Computation	Hardware	SmartThings, Phidgets, Intel Galileo
	Software	Contiki, TinyOS, NimBits, Hadoop
Service		Shipping, smart grid, smart home, smart city
Semantic		RFD, OWL, EXI

۱-۴-۲ مولفه شناسایی اشیاء

وظیفه این مؤلفه تشخیص دستگاه‌ها از یکدیگر در شبکه اینترنت اشیاء است. برای تحقق این موضوع، دستگاه‌ها با استفاده از دو متغیر مهم به نام شناسه شیء^{۲۳} و آدرس شیء^{۲۴} شناسایی می‌شوند [۱۳]. شناسه شیء نام دستگاه را نمایان می‌کند و آدرس شیء آدرس فیزیکی یا منطقی دستگاه در شبکه ارتباطی را ارائه می‌دهد. از آدرس‌دهی IPv۴ و IPv۶ به‌عنوان دو روش اصلی برای ارائه این آدرس‌ها در شبکه اینترنت اشیاء استفاده می‌شود [۲]. این شناسایی از اهمیت بسیاری برخوردار است؛ زیرا امکان مدیریت و ارتباط مؤثر بین دستگاه‌های مختلف در شبکه را فراهم می‌کند.

۲-۴-۲ مولفه حسگرها و عملگرها

در معماری اینترنت اشیاء، مؤلفه حسگرها نقش مهمی در جمع‌آوری داده‌ها از اشیاء یا محیط اطراف دارند. حسگرها وظیفه دارند اطلاعات مرتبط با متغیرهای مختلف محیط مانند دما، رطوبت، و غیره را



شکل ۴: معماری سه لایه اینترنت اشیاء [۱۱]

۳-۲ معماری سه لایه اینترنت اشیاء

باتوجه به فاصله قابل توجه سرورها و مراکز ابری با دستگاه‌های اینترنت اشیاء و افزایش هزینه ناشی از آن و باهدف جلوگیری از چالش‌هایی همچون تأخیر در سامانه‌های بی‌درنگ، مفهوم محاسبات لایه مه^{۱۲} پیشنهاد شده است [۱۰]. ساختار این لایه در شکل ۴ نمایش داده شده است. در ادامه به بررسی ساختار این لایه می‌پردازیم.

۱-۳-۲ لایه مه

دستگاه‌های محاسباتی در لایه مه به‌عنوان لایه میانی بین مراکز داده ابری (لایه ابر) و لایه دستگاه‌های اینترنت اشیاء قرار دارند. این لایه از دستگاه‌هایی همچون مسیریاب‌ها^{۱۳}، دروازه‌ها^{۱۴}، نقاط دسترسی^{۱۵} و غیره تشکیل شده است. در این لایه معمولاً توان پردازشی نسبت به دستگاه‌های اینترنت اشیاء بالاتر است ولی در مقایسه با ابر از توان پردازشی کمتری برخوردار است [۱۲]. برخلاف فناوری رایانش ابری که دستگاه‌های اینترنت اشیاء مستقیماً و بدون واسطه با سرورهای ابری ارتباط برقرار می‌کنند. در این معماری، دستگاه‌های اینترنت اشیاء ابتدا به گره‌های مه متصل می‌شوند و به‌واسطه آن‌ها به ابر متصل می‌شوند [۹].

۲-۳-۲ مقایسه محاسبات در ابر و مه

یکی از معایب فناوری رایانش ابری، تأخیر بالای پاسخ به درخواست کاربران^{۱۶} و انتقال داده است. که این تأخیر بدلیل فاصله فیزیکی اجتناب ناپذیر است [۱۱]. از آنجایی که در رویکرد محاسبات در لایه مه، گره‌های مه که به آن‌ها سرورهای کوچک^{۱۷} یا مراکز داده کوچک^{۱۸} نیز می‌گویند نزدیک به لایه اینترنت اشیاء قرار می‌گیرند در این معماری شاهد کاهش قابل توجه تأخیر هستیم. این نوع محاسبات برای واسطه‌سازی

جدول ۴: مقایسه زیرساخت لایه‌های فیزیکی [۱۸]

Attribute	Bluetooth Low Energy Technology	Wi-Fi	NB-IoT	Sigfox
Range	10m - 1.5 km	15m - 100m	1km - 10 km	3km - 50 km
Throughput	125 kbps - 2 Mbps	54 Mbps - 1.3 Gbps	Up to 200 kbps	Up to 100 kbps
Power Consumption	Low	Medium	Low	Low
Topology	P2P,Star,Mesh,Broadcast	Star, Mesh	Star	Star

را به سکو اینترنت اشیاء ارسال کنند. در انتخاب پروتکل و لایه فیزیکی برای دستگاه‌های اینترنت اشیاء، عواملی مانند مصرف انرژی، دامنه پوشش، پهنای باند، قابلیت‌های امنیتی، قابلیت اطمینان و هزینه‌ها بسیار مهم هستند و باید با دقت مورد بررسی قرار گیرند. جدول ۵ پروتکل‌های لایه کاربرد را باهم مقایسه کرده است.

جدول ۵: مقایسه پروتکل‌های لایه کاربرد [۱۹]، [۲۰]، [۲۱]

Criteria	MQTT	CoAP	AMQP
Year	1999	2010	2003
Architecture	Client/Broker	Client/Server	Client/Server
Header Size	2 Byte	4 Byte	8 Byte
Transport Protocol	TCP	UDP, SCTP	TCP, SCTP
Security	TLS/SSL	DTLS,IPSec	TLS/SSL, IPSec, SASL
Encoding Format	Binary	Binary	Binary
Licensing Model	Open Source	Open Source	Open Source
Default Port	1883/ 8883 (TLS/SSL)	5683 (UDP Port)/ 5684 (DLTS)	5671 (TLS/SSL), 5672
Organisational Support	IBM, Facebook, Amazon Web Services (AWS)	Cisco, Contiki	Microsoft, Bank of America

۴-۴-۲ مولفه محاسباتی

در ساختار اینترنت اشیاء، مؤلفه محاسباتی یک نقش اساسی ایفا می‌کند و از دو بخش مهم سخت‌افزار و نرم‌افزار تشکیل شده است. در بخش سخت‌افزار، بسیاری از سکوها سخت‌افزاری همانند ESP۳۲، In-PI Raspberry، ProLiant و Galileo tel برای لایه مه و Hadoop برای لایه ابر طراحی شده‌اند تا بتوانند برنامه‌های اینترنت اشیاء را اجرا کنند. این سکوها می‌توانند محاسبات پیچیده، جمع‌آوری

اندازه‌گیری کرده و این داده‌ها را به سرویس‌های مه یا ابری ارسال کنند. این داده‌ها سپس در محیط ابری تجزیه و تحلیل می‌شوند تا الگوها و اطلاعات مفهومی استخراج شوند. این تجزیه و تحلیل امکان ارائه داده‌های مفهومی و قابل استفاده را فراهم می‌کند که می‌تواند در تصمیم‌گیری‌های وابسته به اینترنت اشیاء مفید باشد [۱۳].

همچنین در اینترنت اشیاء، از عملگرها (دستگاه‌های کنترل‌شونده) نیز استفاده می‌شود. عملگرها دستگاه‌های سخت‌افزاری هستند که عملیاتی بر روی محیط انجام می‌دهند؛ مانند روشن و خاموش کردن یک سوئیچ. عملگرها همچنین برای اعمال تغییرات و کنترل اشیاء فیزیکی در محیط استفاده می‌شوند. به عبارت دیگر، حسگرها اطلاعات جمع‌آوری می‌کنند و عملگرها عملیات اجرایی را انجام می‌دهند [۲].

۳-۴-۲ مولفه ارتباطات

در ساختار اینترنت اشیاء، مؤلفه ارتباطات نقش اساسی در ارتباط و تبادل داده بین اشیاء و خدمات مختلف ایفا می‌کند. این مؤلفه شامل مجموعه‌ای از اشیاء متنوع است که می‌توانند از انواع فناوری‌ها و پروتکل‌های ارتباطی برای ارتباط با یکدیگر و با سکوها ارتباطی استفاده کنند. درعین حال، اشیاء مانند حسگرها و دستگاه‌های دیگر از طریق فناوری‌های ارتباطی مختلفی با واسطه مانند SigFox، ZigBee، LoRa، BLE^{۲۵}، NB-IoT و غیره و یا بدون واسطه همانند Wi-Fi^{۲۶}، LTE Fi^{۲۷} و غیره به سکو اینترنت اشیاء^{۲۸} متصل می‌شوند [۱۴]. این فناوری‌ها به دستگاه‌ها امکان ارتباط و اتصال به شبکه اینترنت اشیاء و ارسال داده‌ها را می‌دهند؛ بنابراین، مؤلفه ارتباطات نقش اساسی در امکان برقراری ارتباط و تبادل داده بین اشیاء مختلف در محیط اینترنت اشیاء ایفا می‌کند و از اهمیت بالایی برخوردار است. این ارتباطات و فناوری‌ها مختلف تضمین می‌کنند که اشیاء قادر به اشتراک‌گذاری داده‌ها و ارتباط مؤثر با یکدیگر و با سامانه‌های مرکزی باشند. در ادامه برخی از این فناوری و پروتکل‌ها معرفی می‌شوند.

۱-۳-۴-۲ زیرساخت لایه‌های فیزیکی

زیرساخت‌های لایه فیزیکی اینترنت اشیاء شامل مجموعه‌ای از فناوری‌ها و دستگاه‌هایی هستند که برای اتصال و ارتباط بین اشیاء استفاده می‌شوند. این استانداردها و پروتکل‌ها برای اطمینان از سازگاری و تعامل بین اشیاء استفاده می‌شوند. مهمترین لایه‌های فیزیکی برای دستگاه‌های اینترنت اشیاء شامل LoRa، BLE، WiFi، Zigbee و غیره هستند. هر کدام از این لایه‌ها ویژگی‌ها و کاربردهای خاصی دارند و به تناسب نیازهای دستگاه‌ها و محیط‌های مورد استفاده انتخاب می‌شوند [۱۵]، [۱۶]، [۱۷]. جدول ۴ برخی از این زیرساخت‌ها را از جنبه‌های مختلف باهم بررسی و مقایسه کرده است.

۲-۳-۴-۲ پروتکل‌های لایه کاربرد

پروتکل‌های لایه کاربرد در اینترنت اشیاء مثل MQTT^{۲۸}، CoAP^{۲۹}، AMQP^{۳۰} و غیره از اهمیت بالایی برخوردارند چرا که به دستگاه‌ها امکان می‌دهند تا به شبکه اینترنت اشیاء متصل شوند و داده‌های خود

۲-۴-۶ مولفه استخراج معنایی از اطلاعات

اینترنت اشیاء خدمات مختلفی را ارائه می‌دهد که برای انجام برخی از آن‌ها به دانش نیاز دارد و به‌منظور به‌دست‌آوردن این دانش به روش‌های مختلفی از دستگاه‌ها استفاده می‌شود [۲]. استخراج دانش می‌تواند شامل یافتن و استفاده از منابع، مدل‌سازی اطلاعات، تشخیص، تجزیه و تحلیل داده‌ها به‌منظور تصمیم‌گیری و ارائه خدمات صحیح باشد. در واقع، این مؤلفه از اهمیت زیادی برای درک و ارتقا عملکرد سامانه‌های اینترنت اشیاء و ارتباط با دنیای اطلاعات برخوردار است [۱۳]. بنابراین، می‌توان ادعا کرد که این مؤلفه مغز سامانه‌های اینترنت اشیاء است.

۳ سکوهاى اینترنت اشیاء

در برنامه‌های اینترنت اشیاء، استفاده از یک سکو مناسب برای اجرا و مدیریت عملکرد دستگاه‌ها و جمع‌آوری داده‌ها دارای اهمیت بسیاری است. این سکوها برای کاربران این قابلیت را فراهم می‌آورند تا از داده‌ها و اطلاعات جمع‌آوری شده از دستگاه‌های اینترنت اشیاء بهره‌برداری کنند و تصمیمات آتی خود را بر اساس آن اتخاذ کنند [۲۴]. در حال حاضر بیش از ۶۲۰ سکو اینترنت اشیاء در بازار وجود دارد و این تعداد به سرعت در حال رشد است [۲۵].

۳-۱-۳ معیارهای کلیدی برای انتخاب سکوی اینترنت اشیاء مناسب

با افزایش تعداد سکوهاى اینترنت اشیاء توسط ارائه‌دهندگان و تأمین‌کنندگان مختلف، انتخاب سکوی مناسب برای برنامه‌های خاص اینترنت اشیاء به یک چالش جدی تبدیل شده است. در برخی موارد، شرکت‌ها بدون تجزیه و تحلیل نیازمندی‌های خود سکویی را انتخاب می‌کنند که ممکن است در آینده به مشکلات جبران‌ناپذیری منجر شود. انتخاب سکوی مناسب بستگی به عوامل مختلفی از جمله نوع دستگاه مورد استفاده در پروژه اینترنت اشیاء، پروتکل مورد استفاده، نحوه نمایش داده‌ها، نوع خدمات مورد نیاز و غیره بستگی دارد؛ بنابراین، شرکت‌ها باید این گزینه‌ها را به‌دقت بررسی و تحلیل کنند، پیش از آن که به فکر سرمایه‌گذاری در یک سکو خاص اینترنت اشیاء بيفتند. در ادامه برخی از معیارهای کلیدی برای انتخاب سکوی اینترنت اشیاء مناسب را برمی‌شماریم.

۳-۱-۳-۱ پایداری

پایداری سکوهاى اینترنت اشیاء به عنوان یکی از مسائل اساسی در طراحی و اجرای سکوهاى اینترنت اشیاء مطرح است. پایداری در اینجا به معنای توانایی سامانه اینترنت اشیاء برای عملکرد صحیح در مدت طولانی است. برای افزایش پایداری سامانه‌های اینترنت اشیاء، باید دسترس‌پذیری^{۳۷} سامانه تا حد امکان بالا باشد. از این رو، باید از تجهیزات و سرورهای معتبر و پایدار استفاده کرد و یا از یک شرکت ارائه‌دهنده خدمات زیرساخت ابری معتبر استفاده نمود. همچنین جهت افزایش پایداری، می‌توان از معماری‌های توزیع شده استفاده

و پردازش داده‌ها را انجام دهند [۱۳]. در بخش نرم‌افزار، نقش سیستم عامل بسیار مهم است چرا که تقریباً در تمام زمان فعالیت دستگاه اجرا می‌شود و برنامه‌های اینترنت اشیاء را میزبانی می‌کند. در مجموع مؤلفه محاسباتی در ساختار اینترنت اشیاء امکان اجرای برنامه‌های مختلف، جمع‌آوری، پردازش داده‌ها و ارتباط مؤثر با سرویس و سکوهاى ابری را ایجاد می‌کند [۲].

۲-۴-۵ مولفه خدمات

مؤلفه خدمات در معماری اینترنت اشیاء وظیفه ارائه خدمات مختلف به توسعه‌دهندگان برنامه‌های اینترنت اشیاء را برعهده دارد این نقطه شروعی برای توسعه برنامه‌های اینترنت اشیاء است. این خدمات می‌توانند شامل خدمات مرتبط با هویت، خدمات تجمیع اطلاعات، خدمات آگاهی از همکاری و خدمات پویا باشند [۱۳].

۲-۴-۵-۱ خدمات مرتبط با هویت

خدمات مرتبط با دستگاه‌های اینترنت اشیاء به دو دسته هویت فعال^{۳۱} و هویت غیرفعال^{۳۲} تقسیم می‌شوند. خدمات مربوط به هویت فعال، اطلاعاتی را منتشر می‌کنند و به منبع تغذیه یا باتری برای انرژی نیاز دارند. این خدمات قادر به انتقال اطلاعات به دستگاه‌های دیگر هستند. از طرف دیگر، خدمات غیرفعال، که منبع تغذیه خاصی ندارند، برای انتقال هویت خود نیاز به دستگاه خارجی یا سازوکار خاصی دارند [۱۳]. این خدمات فقط قادر به خواندن اطلاعات از دستگاه‌ها هستند. از جمله خدمات غیرفعال می‌توان به ^{۳۳}UWB (Passive) و ^{۳۴}RFID اشاره کرد [۲۲]، [۲۳].

۲-۴-۵-۲ خدمات تجمیع اطلاعات

این خدمات به جمع‌آوری داده‌ها از حسگرها، پردازش این داده‌ها و انتقال آن‌ها به برنامه‌ها و سامانه‌های اینترنت اشیاء جهت بهره‌برداری می‌پردازد. در این فرایند، اطلاعات از حسگرهای مختلف از جمله نور، فشار و سایر حسگرها جمع‌آوری می‌شوند. سپس، این داده‌ها با استفاده از پردازش و تحلیل داده‌های پیشرفته تجزیه و تحلیل می‌شوند تا دانش مفیدی استخراج شود [۲]. در نهایت، این اطلاعات به برنامه‌های اینترنت اشیاء ارسال می‌شوند تا امکان کنترل و مدیریت دستگاه‌ها و فرایندهای مختلف از راه دور فراهم شود [۱۳].

۲-۴-۵-۳ خدمات آگاهی از همکاری

این خدمات از داده‌هایی که توسط خدمات تجمیع اطلاعات فراهم می‌شود و از فناوری‌های مدرن مانند هوش مصنوعی^{۳۵}، هوش تجاری^{۳۶} و تجزیه و تحلیل داده‌ها به منظور بهره‌برداری بهینه و ارائه راهکارهای مبتنی بر داده استفاده می‌کنند این خدمات به افراد یا سازمان‌ها کمک می‌کنند تا تصمیمات بهتری بگیرند و به واکنش‌های مناسب در مواجهه با چالش‌ها، فرصت‌های اقتصادی و تجاری دست یابند [۲]. همچنین نتایج حاصل از این خدمات در هر زمان به کاربران در هر مکانی که نیاز داشته باشند، ارائه می‌شود [۱۳].

کرد. این امر باعث توزیع بار^{۳۸}، افزایش امنیت و امکان جبران اختلالات در اجزای مختلف سامانه می‌شود. تعداد سرورها در یک سکو اینترنت اشیا نقش مهمی در پایداری ایفا می‌کند. اگر تعداد سرورها کم باشد، احتمال بروز خطا افزایش می‌یابد. از طرف دیگر، افزایش تعداد سرورها می‌تواند بروز مسائل مدیریتی و پیچیدگی هزینه را شامل باشد. در مجموع، پایداری سکوها اینترنت اشیا نیازمند یک ترکیب مناسب از ابزار، منابع، مدیریت و استراتژی‌های بهینه است. همچنین، نیاز به رصد مداوم و اقدامات پیشگیرانه برای شناسایی و رفع مشکلات پیش‌بینی نشده نیز دارد.

۳-۱-۲ قابلیت توسعه پذیری و انعطاف

از جمله عوامل مهم در انتخاب سکو اینترنت اشیا، قابلیت توسعه و انعطاف‌پذیری آن‌ها است. باید اطمینان حاصل کرد که سکوی انتخابی در طول زمان با تغییر نیازها و رشد سازمان همچنان مفید واقع می‌شود. همچنین سکوی انتخابی باید انعطاف‌پذیری و پویایی کافی داشته باشد تا با تغییرات سریع در پروتکل‌ها، فناوری‌ها و زیرساخت‌ها هماهنگ شود. همچنین مهم است که سکوها قادر به تعامل با تمامی سامانه‌های ارتباطی باشند و برای گذر از محدودیت سازندگان دستگاه‌ها به کاربر کمک کنند و با تمامی فناوری‌ها و پروتکل‌های مختلف سازگاری داشته باشند. این ویژگی‌ها باعث می‌شوند که سکوها قابلیت سازگاری با نیازهای متغیر و فناوری‌های جدید را داشته باشند و برای طولانی مدت دردسترس باقی بماند [۲۶].

۳-۱-۳ مدل قیمت‌گذاری و وضعیت تجاری

یکی دیگر از موارد مهم در سکوها اینترنت اشیا، مدل قیمت‌گذاری و وضعیت تجاری‌سازی آن است. باید توجه داشت که برخی از ارائه‌دهندگان سکوها نحوه قیمت‌گذاری خود را شفاف اعلام می‌کنند، درحالی‌که برخی دیگر ممکن است در ابتدا نرخ رقابتی ولی نامعتبر را نمایش دهند ولی در زمان انعقاد قرارداد تحت عناوین مختلف درخواست افزایش قیمت داشته باشند. هزینه سرویس‌دهی در سامانه‌های اینترنت اشیا بسیار حائز اهمیت است [۲۶]، [۱۳].

۳-۱-۴ امنیت

یکی از جنبه‌های حیاتی در اینترنت اشیا، امنیت است، زیرا سامانه‌های اینترنت اشیا اطلاعات حساس و ارتباطات بین دستگاه‌ها را مدیریت می‌کنند. امنیت در اینترنت اشیا شامل موارد مختلفی می‌شود از جمله امنیت شبکه از دستگاه به ابر، رمزنگاری داده، تأیید هویت دستگاه، امنیت ابر و امنیت دستگاه و غیره که شامل تأیید هویت دستگاه و استفاده از گواهی‌نامه‌های امنیتی می‌شود. این زیرساخت‌های امنیتی به منظور محافظت از داده‌ها، حریم خصوصی کاربران، جلوگیری از دسترسی غیرمجاز و جلوگیری از حملات سایبری طراحی می‌شوند و باید در تمامی سکوها اینترنت اشیا موجود باشند.

۳-۱-۵ پشتیبانی از پروتکل‌های نوظهور

در اینترنت اشیا، برای ارتباط بین دستگاه‌ها و انتقال داده‌ها از پروتکل‌های مختلفی استفاده می‌شود. از جمله پروتکل‌های مورد استفاده در سکوها اینترنت اشیا پروتکل‌های MQTT، AMQP و CoAP است. با پیشرفت فناوری، دستگاه‌های جدیدی به بازار عرضه شده‌اند و این امر نیازمند به پشتیبانی از پروتکل‌های جدید توسط سکوها اینترنت اشیا است. به عبارت دیگر سکوها اینترنت اشیا باید توانایی انعطاف‌پذیری در امر پشتیبانی از پروتکل‌های جدید و به‌روزرسانی آن‌ها را داشته باشند تا با تغییرات در فناوری و نیازهای دستگاه‌های جدید همگام شوند [۱۳].

۳-۱-۶ ابزارهای تجزیه، تحلیل و تجسم داده

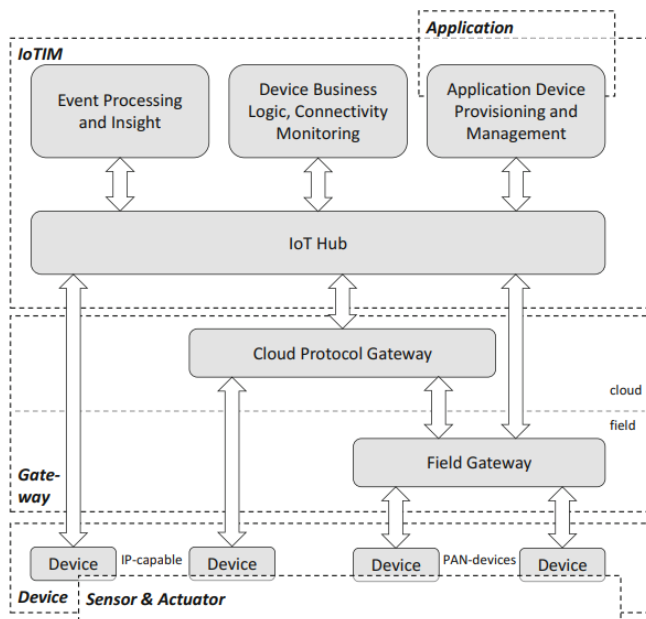
در محیط اینترنت اشیا، اطلاعات تولید شده توسط دستگاه‌ها و حسگرها بسیار حیاتی هستند. برای بهره‌برداری بهینه از این اطلاعات، ابزارهای تجزیه، تحلیل داده و بصری‌سازی اهمیت زیادی دارند. قبل از انتخاب یک سکو اینترنت اشیا، کاربران باید بررسی کنند که آیا سکو انتخابی قابلیت‌های مناسبی برای جمع‌آوری، تجزیه و تحلیل داده‌ها دارد و آیا قادر است این داده‌ها را به صورت مؤثر بصری‌سازی^{۳۹} کند؟ علاوه بر قابلیت استفاده از ابزارهای هوش مصنوعی و هوش تجاری جهت تحلیل و تجزیه اطلاعات به عنوان یک پشتوانه مهم، ضروری و حیاتی است. همچنین، مهم است که این سکوها به جای استفاده از قابلیت‌های داخلی که ممکن است محدودیت‌هایی داشته باشند ابزارهای تجزیه و تحلیل داده معتبر را به خوبی ادغام کنند [۲۶]. این امر به بهبود کارایی و توانایی‌های تجزیه و تحلیل داده در محیط اینترنت اشیا کمک می‌کند و به کاربران امکان اخذ تصمیم‌های دقیق‌تری می‌دهد.

۳-۲ مزایای استفاده از سکوها اینترنت اشیا

استفاده از سکوها اینترنت اشیا برای اتصال و مدیریت دستگاه‌های مختلف به شبکه اینترنت اشیا به عنوان یک ابزار بسیار مهم و مفید شناخته می‌شود. این سکوها به تحلیل داده‌ها، اجرای عملیات هوشمند و ایجاد ارتباط بین دستگاه‌ها کمک می‌کنند. در ادامه به مزایای استفاده از سکوها اینترنت اشیا اشاره می‌کنیم:

۱. مدیریت مرکزی: سکوها اینترنت اشیا برای ما این امکان را فراهم می‌کنند تا همه دستگاه‌های اینترنت اشیا بتوانند توسط یک واحد مرکزی مدیریت شوند. این قابلیت به ما کنترل بهتری بر روی دستگاه‌ها و داده‌های آن‌ها می‌دهد.

۲. ایجاد ارتباطات بین دستگاه‌ها: این سکوها قادر به اتصال دستگاه‌های متفاوت با قالب‌ها و پروتکل‌های مختلف به شبکه اینترنت اشیا هستند. این امکان به شما این اجازه را می‌دهد که دستگاه‌های مختلف از برندهای متفاوت با یکدیگر ارتباط برقرار کنند. این مزیت، چالش قفل فروش^{۴۰} را برطرف کرده است. لازم به ذکر است که قفل فروش به وضعیتی گفته می‌شود که مشتری به یک تأمین‌کننده خاص یا فناوری واحد محدود شده و مهاجرت به خدمات یا محصولات دیگر برای آن هزینه‌بر و با دشواری همراه است.



شکل ۵: Microsoft Azure IoT Hub

کرده بود [۱۳]. شرکت‌هایی نظیر Apple-iCloud، EasyJet و Xe-rox از این سکو بهره برده‌اند. یک نوع از خدمات ویژه این سکو Azure IoT Suite است که مجموعه‌ای از خدمات و ابزارهایی است که برای توسعه و مدیریت دستگاه‌های اینترنت اشیا به کار می‌رود. Azure IoT Hub یکی از خدمات اصلی Azure IoT Suite است که دارای طیف وسیعی از ویژگی‌ها و قابلیت‌ها است که آن را به یک ابزار قدرتمند برای اتصال، مدیریت، ذخیره‌سازی و تجزیه و تحلیل داده‌ها از دستگاه‌های اینترنت اشیا تبدیل می‌کند [۲۸]. دستگاه‌های مبتنی بر IP می‌توانند از طریق پروتکل‌های HTTP، MQTT یا AMPQ با Azure IoT Hub ارتباط برقرار کنند. مطابق شکل ۵ ارتباط دستگاه‌های دیگر با Azure IoT Hub از طریق دروازه‌های پروتکل اینترنتی خواهند بود. همچنین این برای ویژگی‌های اینترنت اشیا امکان ارتباط دوطرفه را فراهم می‌کند. تمام داده‌های ارسالی به این سکو از طریق TLS رمزگذاری می‌شوند تا امنیت اطلاعات تضمین شود. احراز هویت کاربران و دستگاه‌ها بر پایه توکن صورت می‌گیرد و همچنین از احراز هویت X.۵۰۹ برای تبادل امن داده‌ها بین دستگاه‌ها با استفاده از پروتکل‌های AMQP یا WebSocket استفاده می‌شود [۲۶]، [۲۵].

۲-۴ IBM Watson IoT

این سکو یک سرویس مبتنی بر ابر است که با هدف مدیریت دستگاه‌های اینترنت اشیا طراحی شده است و قابلیت مقیاس‌پذیری دارد، در نتیجه می‌تواند پاسخگوی تعداد بی‌شمار دستگاه و حجم بالای داده‌ها باشد. یکی از ویژگی‌های مهم این سکو، سرعت بالای انتقال داده‌ها است. شکل ۶ معماری این سکو اینترنت اشیا را به تصویر کشیده است. این سکو از طریق سکو Bluemix IBM

۳. امنیت: سکوی اینترنت اشیا معمولاً امکانات امنیتی برای حفاظت از داده‌ها و دستگاه‌ها را فراهم می‌کنند. این امکانات شامل احراز هویت، رمزنگاری و کنترل دسترسی می‌شوند. شایان ذکر است که استفاده از سکوی اینترنت اشیا می‌تواند به کسب و کارها و سازمان‌ها کمک کند تا عملکرد خود را تحلیل کنند و بهبود بخشند و از مزایای اینترنت اشیا بهره‌برند.

۳-۳ چالش و مشکلات پیشرو

سکوی اینترنت اشیا با ویژگی‌ها و مزایای بسیاری همراه هستند اما با چالش‌ها و مشکلاتی نیز روبرو هستند. در ادامه به برخی از مهمترین چالش‌ها و مشکلات این حوزه اشاره شده است.

۱. امنیت در سکوی اینترنت اشیا منبع باز: از آنجا که سکوی اینترنت اشیا منبع باز، توسط چندین توسعه‌دهنده مستقل پیاده‌سازی می‌شوند و معمولاً فاقد واحد نظارت کننده مرکزی هستند، امکان به خطر افتادن مسائل امنیتی این سکوها توسط مهاجمین بیشتر است. لذا، این موضوع می‌تواند اطلاعات حساس کاربران را در معرض افشا قرار بدهد.

۲. افزایش بار شبکه: افزایش تعداد اشیا متصل به اینترنت ممکن است منجر به ترافیک بالا و افزایش بار شبکه در هنگام دسترسی به سکوی اینترنت اشیا شود که نیاز به زیرساخت‌های متناسب دارد.

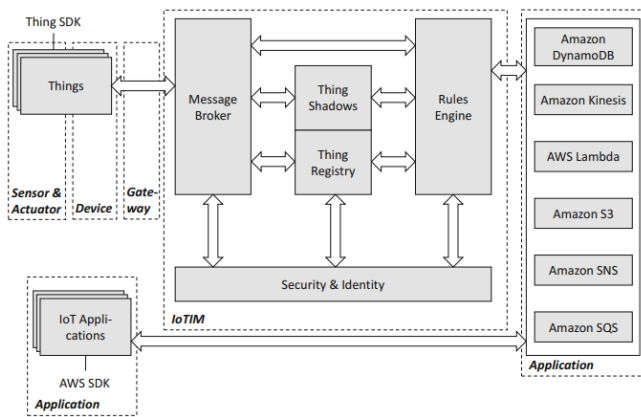
۳. قوانین و مقررات: هر کشور ممکن است دارای قوانین و مقررات خاصی برای اینترنت اشیا باشد که باید رعایت شوند. این مسئله می‌تواند به چالش‌های حقوقی منجر شود. برای حل این مشکلات و چالش‌ها، تلاش‌های مستمر در زمینه توسعه فناوری‌های مرتبط و ایجاد استانداردهای مناسب انجام شده است. همچنین توجه به مسائل امنیتی و حریم خصوصی، بهینه‌سازی مصرف انرژی، تحقیقات در زمینه مدیریت داده و تجزیه و تحلیل آن‌ها از اهمیت بالایی برخوردار هستند.

۴ کارهای پیشین

تاکنون، سکوی اینترنت اشیا به دلیل فراهم کردن عناصر سازنده برای اجرای پروژه‌ها و سرویس‌های مرتبط با اینترنت اشیا، نقش مهمی را ایفا کرده‌اند. با این حال، به دلیل عدم وجود استانداردهای یکپارچه و توسعه متمرکز در زمینه اینترنت اشیا، تنوع و تفاوت‌های زیاد در معماری سکوی اینترنت اشیا پدیدار شده است. همان‌طور که در بخش‌های پیشین گفته شد، به صورت پیوسته تعداد سکوی اینترنت اشیا در حال افزایش است [۲۷]. در این بخش معماری سکوی اینترنت اشیا شناخته شده را به تفصیل معرفی می‌کنیم.

۱-۴ Microsoft Azure IoT Hub

این سکو بخشی از ابر Microsoft Azure است که از طریق آن می‌توان برنامه‌ها و خدمات مختلف را در ابر مایکروسافت اجرا کرد، در سال ۲۰۱۰ به بازار عرضه شد و تا سال ۲۰۱۸، ۲۴٪ سهم بازار را اشغال



شکل ۷: AWS IoT

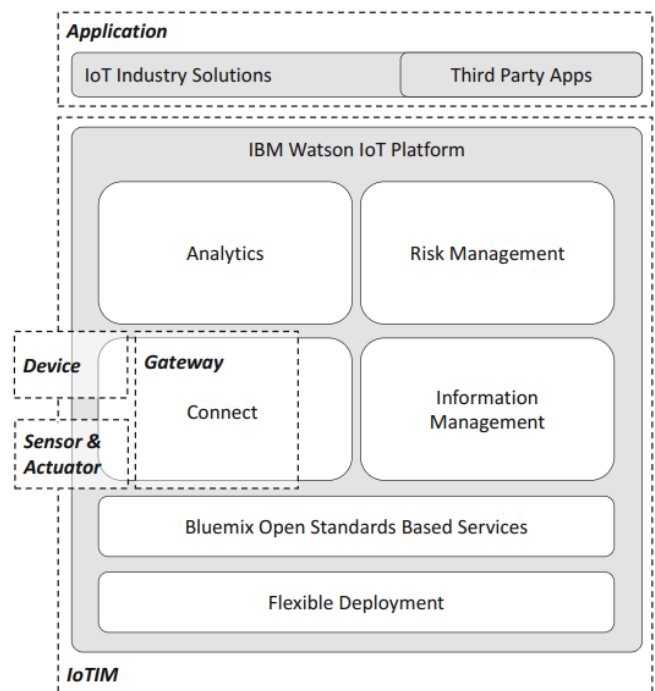
را فراهم کرده که در مدیریت و همگام‌سازی وضعیت اشیاء کمک می‌کند [۳۰]. بعلاوه ثبت اشیاء به مدیریت ثبت و اطلاعات مرتبط با اشیاء کمک می‌کند و موتور قوانین مسئول پردازش و ارسال داده بر اساس قوانین تعریف شده است. در مجموع، AWS امکانات ذخیره‌سازی، توان محاسباتی، مدیریت داده و غیره را برای طیف گسترده‌ای از مشاغل سازمان‌ها و موسسات آموزشی فراهم کرده است و از خدمات هوش مصنوعی نیز بهره می‌برد. سازمان‌های شناخته شده‌ای چون Drop-box، Netflix و Philips از خدمات AWS بهره‌مند هستند [۲۶].

۴-۴ Google Cloud Platform

Google Cloud Platform که از آن به اختصار با عنوان GCP نیز یاد می‌شود یک سکوی محبوب رایانش ابری است که در سال ۲۰۰۸ توسط شرکت گوگل ارائه و راه‌اندازی شده است. در سال ۲۰۱۸، این سکوی سهمی حدود ۱۲٪ از بازار خدمات ابری داشت. GCP دو فناوری مهم به نام رایانش ابری و محاسبات لبه استفاده می‌کند و طیف گسترده‌ای از خدمات در حوزه اینترنت اشیاء از جمله Cloud IoT Core، Cloud Pub/Sub، Cloud Dataflow و Cloud Dataproc را ارائه می‌دهد [۲۸]. همچنین به دلیل استفاده از رابط‌های کاربری و ابزارهای مدیریتی آسان، خدمات هوش مصنوعی پیشرفته همچون Cloud Vision API و Cloud Natural Language API و باهدف بهبود خودکار تصمیم‌گیری‌ها، مقیاس‌پذیری و انعطاف‌پذیری پویا، حفاظت از امنیت زیرساخت‌ها و تعهد ۹۹.۹ درصدی برای دسترسی‌پذیری بسیار مورد توجه قرار گرفته است. سازمان‌های شناخته شده همچون PayPal و Bloomberg از خدمات و زیرساخت ابری GCP برای اجرای برنامه‌ها استفاده می‌کنند [۲۶]، [۳۰].

۵-۴ Oracle IoT

Oracle IoT یک سکوی جامع اینترنت اشیاء مبتنی بر کلان داده است که به سازمان‌ها کمک می‌کند داده‌های دنیای واقعی را از حسگرها، دستگاه‌ها و سامانه‌ها جمع‌آوری، ذخیره، تجزیه و تحلیل و ادغام کنند. همچنین از تحلیل داده در محیط لبه برای پردازش داده‌ها



شکل ۶: IBM Watson IoT

قابل دسترسی است که کار توسعه‌دهندگان برنامه‌های موبایل و وب را نیز آسان‌تر می‌کند [۲۵]. دستگاه‌های اینترنت اشیاء از طریق پروتکل MQTT به سکوی IoT Watson متصل می‌شوند که مدیریت دستگاه‌ها و نمایش داده‌ها را پشتیبانی می‌کند. برای افزایش امنیت، این سکوی TLS برای رمزگذاری داده‌های ارسالی استفاده می‌کند و احراز هویت کاربران و دستگاه‌ها از طریق توکن احراز هویت، کلید API یا توکن تعریف شده توسط کاربر انجام می‌شود. این اقدامات به منظور ایجاد ارتباط امن جهت مدیریت داده و دستگاه‌های اینترنت اشیاء انجام می‌شود [۲۶]، [۲۹].

۳-۴ AWS IoT

AWS که مخفف Amazon Web Services است، مجموعه‌ای از بزرگ‌ترین ارائه‌دهندگان خدمات رایانش ابری است که توسط شرکت آمازون ارائه می‌شود. شرکت آمازون سرویس‌های وب خود را در سال ۲۰۰۶ راه‌اندازی کرد و تا سال ۲۰۱۸ با سهم بازار ۳۳٪ به عنوان یکی از سکوهایی پیش‌تاز شناخته شده بود [۱۳]. AWS یک سکوی ابری مدیریت شده برای اینترنت اشیاء است که بر ایده اشیاء به جای دستگاه‌ها تمرکز دارد. اشیاء در واقع دستگاه‌هایی با حسگر و عملگرهای یکپارچه هستند. شکل ۷ معماری سرویس‌های ابری آمازون برای اینترنت اشیاء را نشان می‌دهد. معماری AWS شامل یک دروازه است که بین اشیاء و مولفه تبادل پیام قرار دارد. نقش دروازه در تسهیل ارتباط بین اشیاء و دیگر مؤلفه‌هاست. مولفه تبادل پیام مسئولیت انجام ارتباط و تبادل داده بین اشیاء را دارد و نقش مرکزی در جریان داده ایفا می‌کند. در این معماری، Thing Shadows امکان ساخت نمایش‌های مجازی از اشیاء فیزیکی

در نزدیکی منابع اینترنت اشیاء استفاده می‌کند [۲۵]. این سکو همچون رقبای خود، از فناوری‌های رایانش ابری و هوش مصنوعی با هدف مقیاس‌پذیری، انعطاف‌پذیری و قابلیت دسترسی بالا استفاده می‌کند. مشتریان اصلی این سکو شرکت‌هایی همچون Softbang LLC و Anson McCade هستند که از خدمات و امکانات این سکو برای بهبود عملکرد و تصمیم‌گیری‌های بهتر در زمینه اینترنت اشیاء بهره می‌برند [۲۶]، [۲۸]. جدول ۶ سکوه‌ای اینترنت اشیاء نام برده را براساس ویژگی‌های تعریف شده مقایسه و بررسی کرده است.

جدول ۶: مقایسه سکوه‌ای اینترنت اشیاء [۱۳]

Features	AWS	Microsoft Azure	Google Cloud IoT	IBM Watson IoT	Oracle IoT
Security	Link Encryption (TLS), Authentication (Sig V4, X.509)	Link Encryption (SSL/TSL)	SSL/TLS	Link Encryption (TLS), Authentication (IBM cloud SSO), Identity Management (LDAP)	REST API
Data Analytics	Real Time analytics (Rule engine, Kinesis, AWS Lambda)	Real Time analytics	Real Time analytics (Cloud IoT Core)	Real Time analytics (IBM IoT Real time insights)	Real Time analytics
Protocols	MQTT, HTTP1.1	MQTT, HTTP, AMQP	MQTT	MQTT, HTTPS	MQTT, HTTP
Visualization Tool	AWS IoT dashboard	web portal	Google Data Studio Dashboard	web portal	web portal
Data Format	JSON	JSON	JSON	JSON, CSV	CSV, REST API
Application Environment	Java, C, NodeJS, Javascript, Python, SDK for Arduino, iOS, Android	.Net, UWP, Java, C, NodeJS, Ruby, Android, iOS	Go, Java, Python, .NET, NodeJS, php, Ruby	C#, C, Python, Java, NodeJS	Java, iOS, Javascript, C, Android

در پژوهش [۲۲] نویسندگان یک چارچوب^{۴۱} و ساختار برای مقایسه کمی و کیفی معیارهای سکوی اینترنت اشیاء ارائه داده‌اند. در این پژوهش Thingspeak، Xively و AWS IoT به عنوان سه سکوی اینترنت اشیاء مطرح که در محیط ابری پردازش اطلاعات انجام می‌دهند و هرکدام از آن‌ها دارای ویژگی‌ها و امکانات مخصوص به خود هستند، معرفی شدند سپس با اجرای سناریوهای مختلف در شرایط یکسان، پارامترهای قابلیت اطمینان^{۴۲}، تأخیر و مقیاس‌پذیری در خصوص این سکوها ارزیابی و بررسی شد. برای ارزیابی درصد قابلیت اطمینان، سکوه‌ای اینترنت اشیاء Xively و Thingspeak در مواجهه با نرخ بالای ارسال اطلاعات یا به بیان دیگر ارسال اطلاعات در فواصل زمانی کمتر نتایج گزارش شده نشان می‌دهد که در مدت زمان ۲۰ ثانیه، تعداد کمی از داده‌ها به درستی دریافت شدند و به همین دلیل سکوه‌ای ذکرشده قابلیت اطمینان کمی برای این نوع کاربردها داشتند. این امر به ویژه در فواصل زمانی یک و سه ثانیه واضح است و قابلیت اطمینان این دو سکو تقریباً یکسان گزارش شده است. اما در فواصل زمانی بیشتر، سکو Xively از Thingspeak فاصله گرفته و نسبتاً تعداد بیشتری از داده‌ها را دریافت کرده است که باعث افزایش قابلیت اطمینان این سکو شده است. با این حال، هر دو سکو دارای نوسانات در تعداد داده‌های دریافتی در فواصل زمانی ۱۰ تا ۱۵ ثانیه هستند. در مجموع می‌توان نتیجه گرفت که سکو Xively در فواصل زمانی ۲۰ ثانیه نتیجه بهتری

از نظر قابلیت اطمینان نسبت به سکو Thingspeak دارد. اما کارکرد سکو AWS IoT با دو سکوی دیگر متفاوت است، به این دلیل که حتی با سرعت بالای ارسال اطلاعات، درصد قابلیت اطمینان قابل توجهی (بیش از ۷۰ درصد) دارد و با کاهش سرعت انتقال داده‌ها از دستگاه‌ها، شیب درصد قابلیت اطمینان به ۱۰۰ افزایش پیدا کرده است. بنابراین، واضح است که این سکو از نظر ارزیابی این شاخص به مراتب بهتر از دو سکو دیگر است. لذا، بر اساس نتایج چندین آزمون انجام شده، نویسندگان نتیجه گرفته‌اند که سکو AWS IoT دارای تأخیر متوسط کمتری در دریافت داده از دستگاه‌های اینترنت اشیاء نسبت به دو سکو دیگر است. همچنین سکو Xively نیز دارای تأخیر کمی نسبت به پلتفرم Thingspeak است. با این حال، مجموع تأخیر متوسط دریافت داده‌ها از دستگاه‌ها توسط سکو AWS IoT بیشتر از Xively و این سکو نیز بیشتر از Thingspeak است. این مهم به دلیل درصد بالای قابلیت اطمینان سکوه‌ای AWS IoT و Xively است، به طوری که هر چه تعداد بیشتری از داده‌ها دریافت شود، تأخیر دستگاه‌ها نیز بیشتر خواهد شد. یک نکته مهم دیگر درباره کارایی سکوه‌ای اینترنت اشیاء، که به تأخیر زمانی نیز مربوط می‌شود این است که اگر تأخیر دریافت اطلاعات در زمان‌های مختلف به شدت متفاوت باشد، کارایی سامانه کاهش می‌یابد که این مهم به وسیله انحراف معیار با هدف تعیین پراکندگی تأخیر سکوها جهت دریافت اطلاعات از دستگاه‌ها در زمان‌های مختلف اندازه‌گیری شده است. یکی از معیارهای مهم جهت ارزیابی مقیاس‌پذیری سکوه‌ای اینترنت اشیاء، نزدیک به صفر بودن میزان پراکندگی داده‌های دریافتی از دستگاه‌ها در یک فاصله زمانی مشخص است. از این دیدگاه سکو AWS IoT به مراتب قابلیت مقیاس‌پذیری بیشتری نسبت به دو سکو دیگر دارد. زیرا انحراف معیار میان دو سکو دیگر در میان تعداد مختلف دستگاه‌ها مابین اعداد ۱ و ۲ است، در حالی که این نتیجه برای سکو AWS IoT کمتر از عدد ۰.۵ است. به علاوه یک سکوی اینترنت اشیاء مقیاس‌پذیر باید بتواند با افزایش تعداد دستگاه‌ها و داده‌ها به عملکرد بهینه خود ادامه بدهد. برای ارزیابی مقیاس‌پذیری از انحراف معیار عددی برای نشان دادن میزان پراکندگی داده‌های دریافتی از دستگاه‌ها استفاده شده است. اگر میزان پراکندگی نسبت به افزایش تعداد دستگاه‌ها، با نرخ بسیار بالایی افزایش یابد، این بدان معناست که کیفیت سکوی اینترنت اشیاء با افزایش تعداد دستگاه‌ها، کاهش می‌یابد. در سکو Thingspeak، با افزودن دو دستگاه به سه دستگاه موجود برای ارسال اطلاعات، مقدار پراکندگی داده‌ها به بیش از شش درصد افزایش یافت و با افزایش سه دستگاه دیگر، این رشد به بیش از ۱۲٪ رسید. در سکو Xively، با تغییر تعداد دستگاه‌ها از سه به پنج عدد، رشد انحراف معیار بیش از هفت درصد رسیده است. اما با افزایش تعداد دستگاه‌ها به ۱۰ عدد، نرخ رشد به بیش از ۱۹٪ افزایش یافت. در مورد سکو AWS IoT نیز گزارش شده است که با افزایش تعداد دستگاه‌ها از ۵ به ۸ عدد، نرخ رشد کاهش یافته است و حتی بعد از تبدیل به ۱۰ دستگاه نیز، درصد پراکندگی داده‌ها منفی و انحراف معیار کمتر از مقدار قبلی شده است.

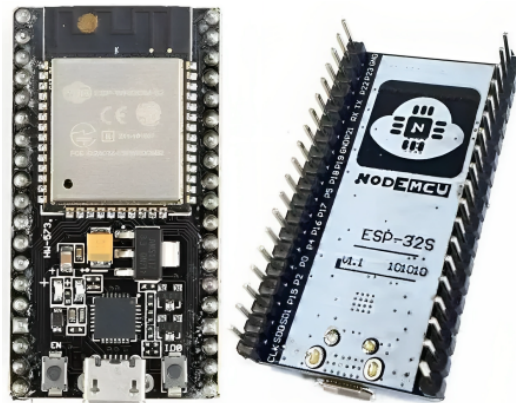
پیاده‌سازی در دستگاه‌های با منابع محدود مانند میکروکنترلرها بوده و باهدف انتقال پیام در دستگاه‌ها و سامانه‌های اینترنت اشیاء طراحی شده است. MQTT برای برنامه‌هایی با مصرف انرژی و پهنای باند کم بهینه‌سازی شده است. معماری این پروتکل به صورت انتشار/اشتراک است که این امکان را فراهم می‌کند تا دستگاه‌ها و برنامه‌ها بتوانند پیام‌ها را به یکدیگر ارسال و دریافت کنند. MQTT دارای یک تبادل کننده پیام^{۴۳} است که وظیفه توزیع پیام‌ها به مقصد مورد نظر را بر عهده دارد [۳۳]. این پروتکل براساس مدل اشتراک گذاری موضوعی عمل می‌کند. هر پیام دارای یک موضوع^{۴۴} است و مشترک‌شونده با اشتراک‌گذاری موضوع‌های مشترک خود، پیام‌های مرتبط را دریافت می‌کنند [۳۴]. از قابلیت‌های مهم این پروتکل، امکان کنترل کیفیت خدمات^{۴۵} می‌باشد که به کاربران امکان تعیین دقیق میزان قطعیت دریافت پیام و تأخیر در ارسال پیام‌ها را می‌دهد. کنترل کیفیت خدمات در پروتکل ارتباطی MQTT به شما اجازه می‌دهد تا مشخص کنید که چگونه داده‌ها بین دستگاه‌های اینترنت اشیاء انتقال یابند و چگونه باید تضمین شود که انتقال به درستی انجام می‌شود [۳۵]. در پروتکل ارتباطی MQTT سه سطح مختلف کنترل کیفیت خدمات وجود دارد که جدول ۸ ذکر شده است. شکل ۹ شمایی از ارتباطات در پروتکل ارتباطی MQTT را نشان می‌دهد.

جدول ۸: انواع کنترل کیفیت خدمات در پروتکل ارتباطی MQTT

کنترل کیفیت خدمات در پروتکل ارتباطی MQTT	
توضیحات	سطوح کنترل کیفیت خدمات
حداکثر یک بار تحویل - انتقال پیام‌ها بدون تضمین تحویل - ذخیره نکردن پیام توسط تبادل کننده - بسیار سریع و مناسب برای داده‌هایی که تحویل آن‌ها ضروری نیستند.	نوع صفر - خدمات تأیید نشده
حداقل یک بار تحویل - عدم از دست رفتن پیام‌ها - احتمال دریافت پیام تکراری	نوع یک - خدمات تأیید شده
دقیقاً یکبار - عدم از دست رفتن پیام‌ها - عدم ارسال تکراری پیام‌ها	نوع دو - خدمات مطمئن

۳-۵ آزمایش

همان‌طور که در زیر بخش‌های قبلی ذکر شد، جهت اندازه‌گیری زمان پاسخ سکوهاى اینترنت اشیاء متفاوت از پروتکل MQTT جهت ارسال بسته با اندازه‌ی مشخص استفاده کرده‌ایم. در این آزمایش هدف ما مقایسه نسبت پیام‌های دریافت شده به کل پیام‌های ارسالی در موعد مشخص در سکوهاى اینترنت اشیاء متفاوت است. این یک معیار مهم در شبکه‌های بی‌سیم محسوب می‌شود. این معیار نشان‌دهنده میزان موفقیت در ارسال و دریافت پیام‌ها در یک بستر بی‌سیم است. به عبارت دقیق‌تر Packet Delivery Ratio یا به اختصار PDR مطابق فرمول (۱) به ما نشان می‌دهد که چه مقدار از پیام‌هایی که در شبکه ارسال می‌شوند، با موفقیت به مقصد خود می‌رسند و چه مقدار از آن‌ها



شکل ۸: برد توسعه ESP-WROOM-32

۵ مشاهدات

در این پژوهش، باهدف مقایسه کیفیت عملکرد و قابلیت اطمینان سکوهاى اینترنت اشیاء آزمایش‌هایی را طراحی و پیاده‌سازی کرده‌ایم. در آزمایش‌ها، از برد ESP۳۲ و پروتکل MQTT جهت بررسی عملکرد سکوهاى اینترنت اشیاء استفاده شده است.

۱-۵ برد ESP۳۲

ما در این آزمایش از برد توسعه ESP۳۲ (شکل ۸) که برای سامانه‌های اینترنت اشیاء به دلیل قیمت پایین و مصرف انرژی کم مناسب است و از ولتاژ ۳.۳ ولت تغذیه می‌کند، استفاده کرده‌ایم.

همچنین این برد، دارای ماژول WiFi داخلی و پشتیبانی از پشته پروتکلی TCP/IP و غیره است. از جمله کاربردهای این برد در تجهیزات خانه هوشمند، دستگاه‌های صنعتی و غیره است. مشخصات این برد در جدول ۷ به تفصیل آورده شده است [۳۱].

جدول ۷: مشخصات برد توسعه ESP32 [۳۲]

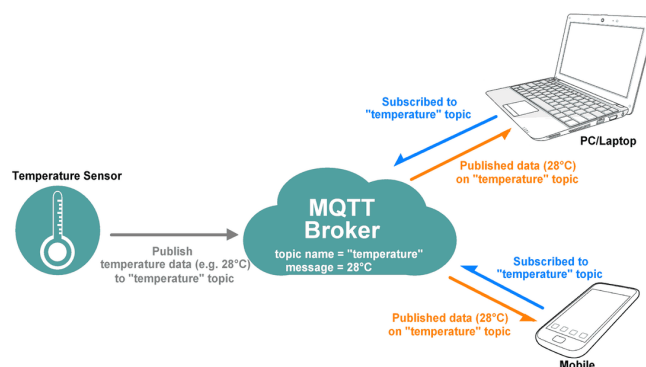
ESP32 Specifications	
Operating Voltage	2.2V to 3.6 V
GPIO	36 Ports
ADC	14 Ports
DAC	2 Ports
Flash Memory	16 Mbyte
SRAM	250 Kbyte
Clock Speed	Up to 240 MHZ
Wi-Fi	2.4 GHz

۲-۵ پروتکل MQTT

پروتکل MQTT که مخفف Message Queuing Telemetry Transport است، یک پروتکل ارتباطی سبک است که به راحتی قابل

جدول ۱۰: مقایسه‌ی سک‌های اینترنت اشیا در برنامه‌های بی‌درنگ

مقایسه‌ی سک‌های اینترنت اشیا در برنامه‌های بی‌درنگ (تمام زمان‌ها برحسب میلی‌ثانیه محاسبه شده‌است)					
سک‌ی اینترنت اشیا	اندازه پیام (بایت)	بیشترین تاخیر	کمترین تاخیر	میانگین تاخیر	نرخ تحویل بسته‌ها
PATRIIoT	۱۰۰	۵۸۴.۳۳	۷	۱۸	۹۹.۷
Thingspeak	۱۰۰	۷۰۸	۲۰۱.۶۶	۳۹۳	۹۵.۴
PATRIIoT	۵۰۰	۶۱۵	۵۷	۶۷	۹۹.۶
Thingspeak	۵۰۰	۷۰۱.۳۳	۲۴۴.۶۶	۳۴۵	۹۲.۱
PATRIIoT	۱۰۲۴	۵۷۴	۱۱۱.۳۳	۱۲۳	۹۹.۴
Thingspeak	۱۰۲۴	۶۹۸.۶۶	۳۰۱	۴۴۵.۶۶	۹۰.۱



شکل ۹: نمونه‌ای از تبادل پیام در پروتکل ارتباطی MQTT

جدول ۱۱: مقایسه‌ی سک‌های اینترنت اشیا در برنامه‌های غیرحساس به زمان

مقایسه‌ی سک‌های اینترنت اشیا در برنامه‌های غیرحساس به زمان (تمام زمان‌ها برحسب میلی‌ثانیه محاسبه شده‌است)					
سک‌ی اینترنت اشیا	اندازه پیام (بایت)	بیشترین تاخیر	کمترین تاخیر	میانگین تاخیر	نرخ تحویل بسته‌ها
PATRIIoT	۱۰۰	۵۶۶	۷	۱۷.۳۳	۹۹.۹
Thingspeak	۱۰۰	۱۱۱۳	۲۱۵	۴۵۶.۶۶	۹۹
PATRIIoT	۵۰۰	۸۷۳	۵۷	۶۹	۱۰۰
Thingspeak	۵۰۰	۱۱۹۶	۲۴۶	۴۴۶	۹۱.۹
PATRIIoT	۱۰۲۴	۹۸۵	۱۱۱	۱۲۶.۳۳	۹۹.۹
Thingspeak	۱۰۲۴	۱۱۴۶	۳۰۵	۵۶۰.۶۶	۹۸.۷

می‌شود که برای آن دسته از برنامه‌هایی که به صورت بی‌درنگ تعریف شده‌اند، بدلیل نیاز به پاسخ‌گویی سریع، از سک‌های بومی استفاده شود تا تأخیر پائینی را در انجام وظایف شاهد باشیم. همچنین، در صورتی که وظایف ما دارای محدودیت‌های زمانبندی باشند (نقطه سررسید^{۴۸} نزدیک)، باتوجه به فاصله‌ی زیاد دستگاه‌ها تا ابر (سک‌ی اینترنت اشیا)، ممکن است نیازمندی‌های برخی از وظایف رعایت نشود. این مهم باعث به وجود آمدن معماری سه لایه اینترنت اشیا شده است تا انجام محاسبات در لبه به حل مشکلات ما کمک کند.

۶ نتیجه‌گیری و کارهای آینده

با توسعه روزافزون اینترنت اشیا، سک‌های اینترنت اشیا به عنوان سک‌به عنوان سرویس^{۴۹} با ساختارها و ویژگی‌های مختلف وارد عرصه جهانی شده‌اند. مدیریت داده، نظارت بر داده، جلوگیری از دست رفتن داده، افزایش سرعت، کاهش تأخیر سامانه و غیره نقش بسیار مهمی در انتخاب و تعیین میزان کیفیت یک سک‌ی مناسب ایفا می‌کند. امید می‌رود تا در پژوهش‌های آتی، با بررسی معیارهای بیشتر، سک‌های اینترنت اشیا را با هدف شناسایی نقاط ضعف و تلاش برای رفع آن‌ها مورد بررسی بیشتر قرار دهیم و در نهایت برای حل چالش‌های این سک‌ها راهکارهای مناسب ارائه دهیم.

در مسیر به دلیل اشکالات مختلف مثل تداخل یا تضعیف سیگنال از دست می‌روند. افزایش PDR به معنای افزایش کارایی و قابلیت اطمینان سامانه است و می‌تواند تأثیر مستقیمی بر کارکرد و عملکرد برنامه و سامانه‌ها داشته باشد.

$$PDR = \frac{\text{Number of Received Packets}}{\text{Number of Packets Sent}} \quad (1)$$

به‌علاوه با هدف مقایسه دقیق‌تر سک‌های اینترنت اشیا در برنامه‌های متعدد، برنامه‌های کاربران را به دو بخش اصلی تقسیم کرده‌ایم که شامل برنامه‌های بی‌درنگ و برنامه‌های غیرحساس به زمان^{۴۶} است. در این پژوهش، برای بدست آوردن محدودیت زمان پذیرفتن بسته برای هر کاربرد ذکرشده، در طول ۲۴ ساعت در فواصل زمانی ۶ ساعته، ۱۰۰ بسته را با فاصله زمانی یک ثانیه ارسال کرده و بیشترین تأخیر را در هر کدام از این ساعات برای هر سک‌ی محاسبه می‌کنیم. نتایج حاصل از این آزمایش در جدول ۹ قابل مشاهده است.

جدول ۹: موعد زمانی جهت پذیرفتن بسته‌های ارسالی

برنامه‌های کاربران		موعد زمانی جهت پذیرفتن بسته (تمامی زمان‌ها برحسب میلی‌ثانیه محاسبه شده است)
بی‌درنگ	۷۰۸	
غیرحساس به زمان	۱۲۰۸	

در این پژوهش که در محیط آزمایشگاه سامانه‌های سایبر-فیزیکی^{۴۷} دانشگاه علم و صنعت ایران انجام شد، اندازه‌ی بسته‌ها را ۵۰۰ و ۱۰۲۴ بایت و تعداد بسته‌های ارسالی را برای هر سک‌ی ۱۰۰۰ عدد در نظر گرفته‌ایم. جداول ۱۰ و ۱۱ نتایج حاصل از این آزمایش‌ها برای سه سک‌ی اینترنت اشیا مختلف را در شرایط یکسان و با سطح کنترل کیفیت خدمات نوع صفر نشان می‌دهد. نظر به آزمایش‌های انجام شده و مشاهدات گزارش شده، توصیه

Symposium on Digital Forensics and Security (ISDFS), pp.1–6, IEEE, 2020.

- [10] P. Cai, F. Yang, J. Wang, X. Wu, Y. Yang, and X. Luo, "Jote: Joint offloading of tasks and energy in fog-enabled iot networks," *IEEE Internet of Things Journal*, vol.7, no.4, pp.3067–3082, 2020.
- [11] V. K. Quy, N. V. Hau, D. V. Anh, and L. A. Ngoc, "Smart health-care iot applications based on fog computing: architecture, applications and challenges," *Complex & Intelligent Systems*, vol.8, no.5, pp.3805–3815, 2022.
- [12] P. Habibi, M. Farhoudi, S. Kazemian, S. Khorsandi, and A. Leon-Garcia, "Fog computing: a comprehensive architectural survey," *IEEE access*, vol.8, pp.69105–69133, 2020.
- [13] M. Ullah, P. H. Nardelli, A. Wolff, and K. Smolander, "Twenty-one key factors to choose an iot platform: Theoretical framework and its applications," *IEEE Internet of Things Journal*, vol.7, no.10, pp.10111–10119, 2020.
- [14] R. S. Sinha, Y. Wei, and S.-H. Hwang, "A survey on lpwa technology: Lora and nb-iot," *Ict Express*, vol.3, no.1, pp.14–21, 2017.
- [15] M. Kanj, V. Savaux, and M. Le Guen, "A tutorial on nb-iot physical layer design," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.22, no.4, pp.2408–2446, 2020.
- [16] J. Yang, C. Poellabauer, P. Mitra, and C. Neubecker, "Beyond beaconing: Emerging applications and challenges of ble," *Ad hoc networks*, vol.97, p.102015, 2020.
- [17] S. C. Ergen, "Zigbee/ieee 802.15. 4 summary," *UC Berkeley, September*, vol.10, no.17, p.11, 2004.
- [18] M. Afaneh, "Wireless connectivity options for iot applications— technology comparison," April 21, 2020. [Online]. Available: <https://www.bluetooth.com/blog/wireless-connectivity-options-for-iot-applications-technology-comparison/>.
- [19] B. Mishra and A. Kertesz, "The use of mqtt in m2m and iot systems: A survey," *IEEE Access*, vol.8, pp.201071–201086, 2020.
- [20] C. Bormann, A. P. Castellani, and Z. Shelby, "Coap: An application protocol for billions of tiny internet nodes," *IEEE Internet Computing*, vol.16, no.2, pp.62–67, 2012.
- [21] N. Q. Uy and V. H. Nam, "A comparison of amqp and mqtt protocols for internet of things," in *2019 6th NAFOSTED Conference on Information and Computer Science (NICS)*, pp.292–297, IEEE, 2019.
- [22] R. Weinstein, "Rfid: a technical overview and its application to the enterprise," *IT professional*, vol.7, no.3, pp.27–33, 2005.

در ادامه، در جدول ۱۲ زمان بندی محتمل برای انجام پژوهش مقطع کارشناسی ارشد قابل مشاهده است.

جدول ۱۲: زمان بندی انجام پژوهش

												مطالعه، تحقیق و جستجو
												خلق ایده و کار بر روی آن
												شبیه سازی سامانه
												پایاده سازی سامانه مورد نظر
												مقایسه با روش های پیشین
												نگارش پایان نامه و مقاله
												ایجاد آمادگی برای دفاع
۶	۵	۴	۳	۲	۱	۱۲	۱۱	۱۰	۹			ماه
سال ۱۴۰۳						سال ۱۴۰۲						

مراجع

- [1] S. Li, L. D. Xu, and S. Zhao, "The internet of things: a survey," *Information systems frontiers*, vol.17, pp.243–259, 2015.
- [2] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, "Internet of things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications," *IEEE communications surveys & tutorials*, vol.17, no.4, pp.2347–2376, 2015.
- [3] J. Manyika, M. Chui, P. Bisson, J. Woetzel, R. Dobbs, J. Bughin, and D. Aharon, "The internet of things: Mapping the value beyond the hype," in McKinsey Global Institute. McKinsey, 2015, p. 3.
- [4] IHS, "Internet of things (iot) connected devices installed base worldwide from 2015 to 2025," 2016.
- [5] United Nations, "World population prospects: The 2015 revision population database," 2016.
- [6] B. Safaei, A. M. H. Monazzah, M. B. Bafroei, and A. Ejlali, "Reliability side-effects in internet of things application layer protocols," in *2017 2nd International Conference on System Reliability and Safety (ICSRS)*, pp.207–212, IEEE, 2017.
- [7] M. Umashankar, S. Mallikarjunaswamy, N. Sharmila, D. M. Kumar, and K. Nataraj, "A survey on iot protocol in real-time applications and its architectures," in *ICDSMLA 2021: Proceedings of the 3rd International Conference on Data Science, Machine Learning and Applications*, pp.119–130, Springer, 2023.
- [8] S. N. Swamy, D. Jadhav, and N. Kulkarni, "Security threats in the application layer in iot applications," in *2017 International conference on i-SMAC (iot in social, mobile, analytics and cloud)(i-SMAC)*, pp.477–480, IEEE, 2017.
- [9] M. R. Raza, A. Varol, and N. Varol, "Cloud and fog computing: A survey to the concept and challenges," in *2020 8th International*

Notes

- Internet of Things .1
- System .2
- Smart Devices .3
- Real-Time .4
- Infrastructure .5
- Perception Layer .6
- Network Layer .7
- Application Layer .8
- Cloud Datacenters .9
- Sensors .10
- Actuator .11
- Fog Layer Computing .12
- Routers .13
- Gateways .14
- Access Point .15
- Response Time .16
- Micro Server .17
- Micro Datacenters .18
- Offloading .19
- Decentralize .20
- Distribute .21
- Fault Tolerant .22
- Object ID .23
- Object Address .24
- Bluetooth Low Energy .25
- Long-Term Evolution .26
- IoT Platform .27
- Message Queuing Telemetry Transport .28
- Constrained Application Protocol .29
- The Advanced Message Queuing Protocol .30
- Active .31
- Passive .32
- Ultra-Wideband .33
- Radio Frequency Identification .34
- Artificial Intelligence .35
- Business Intelligence .36
- [23] M.-G. Di Benedetto, “Uwb communication systems: a comprehensive overview,” 2006.
- [24] G. Fortino, C. Savaglio, G. Spezzano, and M. Zhou, “Internet of things as system of systems: A review of methodologies, frameworks, platforms, and tools,” *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, vol.51, no.1, pp.223–236, 2020.
- [25] J. Mineraud, O. Mazhelis, X. Su, and S. Tarkoma, “A gap analysis of internet-of-things platforms,” *Computer Communications*, vol.89, pp.5–16, 2016.
- [26] P. P. Ray, “A survey of iot cloud platforms,” *Future Computing and Informatics Journal*, vol.1, no.1-2, pp.35–46, 2016.
- [27] T. G. Barros, E. F. D. S. Neto, J. A. D. S. Neto, A. G. De Souza, V. B. Aquino, and E. S. Teixeira, “The anatomy of iot platforms—a systematic multivocal mapping study,” *IEEE Access*, vol.10, pp.72758–72772, 2022.
- [28] J. Guth, U. Breitenbücher, M. Falkenthal, F. Leymann, and L. Reinfurt, “Comparison of iot platform architectures: A field study based on a reference architecture,” in *2016 Cloudification of the Internet of Things (CIoT)*, pp.1–6, IEEE, 2016.
- [29] A. Salami and A. Yari, “A framework for comparing quantitative and qualitative criteria of iot platforms,” in *2018 4th International Conference on Web Research (ICWR)*, pp.34–39, IEEE, 2018.
- [30] P. Pierleoni, R. Concetti, A. Belli, and L. Palma, “Amazon, google and microsoft solutions for iot: Architectures and a performance comparison,” *IEEE access*, vol.8, pp.5455–5470, 2019.
- [31] Espressif, “Esp32,” 2023. [Online].Available :<https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32>.
- [32] Arduino, “Nano esp32,” 2023. [Online].Available:<https://docs.arduino.cc/hardware/nano-esp32>.
- [33] P. Jutadhamakorn, T. Pillavas, V. Visoottiviset, R. Takano, J. Haga, and D. Kobayashi, “A scalable and low-cost mqtt broker clustering system,” in *2017 2nd International Conference on Information Technology (INCIT)*, pp.1–5, IEEE, 2017.
- [34] J. E. Luzuriaga, M. Perez, P. Boronat, J. C. Cano, C. Calafate, and P. Manzoni, “A comparative evaluation of amqp and mqtt protocols over unstable and mobile networks,” in *2015 12th Annual IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, pp.931–936, IEEE, 2015.
- [35] J. Toldinas, B. Lozinskis, E. Baranauskas, and A. Dobrovolskis, “Mqtt quality of service versus energy consumption,” in *2019 23rd International Conference Electronics*, pp.1–4, IEEE, 2019.

Availability	.۳۷
Load Balancing	.۳۸
Visualization	.۳۹
Lock-in Vendor	.۴۰
Framework	.۴۱
Reliability	.۴۲
Broker	.۴۳
Topic	.۴۴
Quality of Service	.۴۵
Time Independent	.۴۶
Cyber-Physical systems Laboratory	.۴۷
Deadline	.۴۸
Platform as a Service	.۴۹