

دراسة مقارنة وتحليلية للمعماريات المرجعية لإنترنت الأشياء: نحو إطار معماري مناسب للمؤسسات الليبية

صلاح الدين عمر أحمد دبك^{1*}، أبو بكر الصديق فتحي السباعي²، عبد الرحمن جمعة منصور أبو سنيينة³

¹قسم الحاسوب، كلية العلوم التقنية، مصراتة، ليبيا

²قسم الحاسوب، كلية العلوم التقنية، مصراتة، ليبيا

³قسم الهندسة الكهربائية والإلكترونية، كلية العلوم التقنية، مصراتة، ليبيا

³البريد الإلكتروني (للباحث المرجعي) Busneina@gmail.com

A Comparative and Analytical Study of IoT Reference Architectures: Towards a Suitable Architectural Framework for Libyan Enterprises

Salaheddin Omar Debbek^{1*}. Abubaker Eseddig Elsebaie². Abdelrahman Guma Busneina³.

¹Department of computer, College of Technical Sciences, Misrata, Libya

²Department of IT, Ministry of Education, Misrata, Libya

³Department of Electrical and Electronics Engineering, College of Technical Sciences, Misrata, Libya

Received: 10/8/2026 Revised: 15/8/2026 Accepted: 05/9/2026 Publication: 29/9/2026

المخلص:

أصبحت الحاجة إلى اختيار معماريات مرجعية مناسبة لإنترنت الأشياء (IoT) أمراً حيوياً لضمان التكامل المؤسسي والكفاءة التشغيلية المرجوة، وذلك يرجع لتزايد توجه المؤسسات الليبية نحو التحول الرقمي وتبني التقنيات الذكية وتأتي هذه الدراسة لتقديم تحليل مقارنة وشامل للمعماريات المرجعية لإنترنت الأشياء بهدف تحديد واستخلاص المتطلبات التقنية والمؤسسية الأكثر ملاءمة لتطوير البنية التحتية الرقمية في القطاعات الخدمية والصناعية داخل البيئة المحلية. اعتمدت المنهجية المتبعة على مراجعة دقيقة وتحليل تقني لخمس من المعماريات المرجعية الرائدة عالمياً وهي نموذج الاتحاد الدولي للاتصالات (ITU-T) وسيسكو (Cisco) وآي بي إم (IBM) وإنتل (Intel) ومايكروسوفت (Microsoft)، حيث جرى تقييم هذه النماذج بناءً على معايير معمارية أساسية تضم إدارة الأجهزة والشبكات، وآليات معالجة وحفظ البيانات، وأطر الأمن السيبراني وحماية الخصوصية، بالإضافة إلى القابلية للتوسع والتشغيل البيني بين الأنظمة ومدى دعمها لحوسبة الحافة، مع الأخذ في الاعتبار التحديات والظروف الخاصة بالبيئة المحلية والتي تتمثل أبرزها في تفاوت استقرار شبكات الاتصال ومحدودية العرض الترددي وتذبذب جاهزية البنية التحتية الأساسية. وأظهرت نتائج التحليل المقارن أهمية الاعتماد الاستراتيجي على معالجة الحافة (Edge Computing) لتقليل الاعتماد المباشر والمستمر على الاتصال بالسحابة المركزية، مما يضمن استمرارية تشغيل الأنظمة الحساسة وتقادي انقطاع الخدمات عند اضطراب الاتصال، كما كشفت النتائج على ضرورة تبني معايير مفتوحة لتسهيل الدمج والتكامل مع الأنظمة القديمة والمستقبلية دون التقيد بمورد محدد. وخلصت الدراسة إلى تقديم اقتراح يتضمن مجموعة من المتطلبات المعمارية والأولويات التقنية المفصلة التي توفر خطة عمل توجّه متخذي القرار في المؤسسات الليبية نحو اختيار وتطبيق المعمارية الأنسب لتحقيق أهداف المؤسسات الليبية.

الكلمات المفتاحية: إنترنت الأشياء (IoT)، التحول الرقمي، المعمارية المرجعية، التشغيل البيئي، حوسبة الحافة، المؤسسات الليبية.

Abstract:

Selecting appropriate reference architectures for the Internet of Things (IoT) has become vital to ensure the desired institutional integration and operational efficiency. This is due to the growing shift of Libyan institutions toward digital transformation and the adoption of smart technologies. This study comes to provide a comprehensive comparative analysis of IoT reference architectures aimed at identifying and extracting the most suitable technical and organizational requirements for developing digital infrastructure in the service and industrial sectors within the local environment. The adopted methodology relied on a thorough review and technical analysis of five leading global reference architectures: the International Telecommunication Union model (ITU-T), Cisco, IBM, Intel, and Microsoft. These models were evaluated based on core architectural criteria including device and network management, data processing and storage mechanisms, cybersecurity and privacy protection frameworks, in addition to scalability, system interoperability, and support for edge computing, while taking into account the challenges and conditions specific to the local environment, most notably the varying stability of communication networks, limited bandwidth, and fluctuating readiness of basic infrastructure. The results of the comparative analysis demonstrated the strategic importance of relying on edge computing (Edge Computing) to reduce direct and continuous reliance on central cloud connectivity, ensuring the continuous operation of critical systems and avoiding service disruptions during connection instability. Results also revealed the necessity of adopting open standards to facilitate integration and compatibility with legacy and future systems without vendor lock-in. The study concludes by offering a proposal that includes a set of detailed architectural requirements and technical priorities, providing a practical action plan to guide decision-makers in Libyan institutions toward selecting and implementing the most suitable architecture to achieve the objectives of Libyan institutions.

Keywords: Internet of Things (IoT), Digital Transformation, Reference Architecture, Interoperability, Edge Computing, Libyan Institutions.

1. المقدمة

يشهد التحول الرقمي في ليبيا اهتماماً متزايداً باعتباره أحد المسارات المهمة لتطوير أداء المؤسسات العامة والخاصة وتحسين آليات تقديم الخدمات للمستفيدين. ويعتمد هذا التحول على توظيف التقنيات الرقمية، والمنصات الإلكترونية، والبنية التحتية للمعلومات، وأنظمة البيانات بهدف تعزيز كفاءة المؤسسات ورفع جودة الخدمات العامة ودعم عملية اتخاذ القرار [1]. كما تشمل تطبيقات التحول الرقمي في ليبيا مجالات متعددة، مثل المدن الذكية، والخدمات الصحية، والطاقة، والنقل، وغيرها من الخدمات العامة، حيث توفر تقنيات المعلومات والاتصالات فرصاً لتحسين جودة الحياة وزيادة كفاءة إدارة الموارد [2].

من بين التقنيات الحديثة الداعمة لهذا التحول تبرز تقنية إنترنت الأشياء (Internet of Things - IoT)، باعتبارها إحدى التقنيات الأساسية الداعمة للأنظمة الذكية، حيث تتيح ربط الأجهزة والمكونات المادية عبر شبكات الاتصال المختلفة، مما يسمح بجمع البيانات وتبادلها والتفاعل فيما بينها لتحسين كفاءة العمليات والخدمات. وقد تناولت دراسات حديثة إمكانية

دراسة مقارنة وتحليلية للمعماريات المرجعية لإنترنت الأشياء: نحو إطار معماري مناسب للمؤسسات الليبية

توظيف تطبيقات إنترنت الأشياء في المدن الليبية، مثل مدينة بني وليد، لتحسين مجالات النقل والطاقة والرعاية الصحية وإدارة النفايات [3].

يُعرّف إنترنت الأشياء (Internet of Things - IoT) بأنه منظومة مترابطة من الأجهزة أو المكونات الإلكترونية القادرة على الاتصال بالشبكات، وتبادل البيانات، والتفاعل فيما بينها أو مع البيئة المحيطة بهدف تنفيذ مهام وتقديم خدمات محددة [4]. وقد أسهم التطور المتسارع في مجال الاتصالات وتقنية المعلومات (ICT) في دعم انتشار هذه التطبيقات، ولا سيما مع ظهور تقنيات الاتصال الحديثة كشبكات الجيل الخامس (5G)، التي توفر قدرات اتصال تدعم أعداداً ضخمة من الأجهزة المتصلة وتخدم مختلف المجالات والتطبيقات الذكية [4].

2. معمارية إنترنت الأشياء والنماذج المرجعية

يصف البناء المعماري لإنترنت الأشياء المكونات والوظائف الأساسية للنظام، والعلاقات بين الأجهزة والشبكات وطبقات المعالجة والتطبيقات، كما يوضح آليات جمع البيانات ونقلها وتخزينها ومعالجتها وتوظيفها في تقديم الخدمات [4][5]. وقد طُرحت العديد من المعماريات والنماذج المرجعية لإنترنت الأشياء نتيجة للأبحاث والدراسات التي سعت إلى تنظيم مكونات هذه الأنظمة وتحديد وظائفها وآليات الاتصال والتكامل بينها. وتختلف هذه المعماريات في عدد الطبقات، وتوزيع الوظائف، وأساليب معالجة البيانات وإدارتها، وآليات الاتصال والتشغيل البيني بين مكونات النظام [4] [6]. ونظراً لتعدد النماذج والمعماريات المرجعية المقترحة لإنترنت الأشياء واختلافها من حيث المكونات والمستويات والوظائف وآليات التكامل [6]، تستعرض هذه الورقة عدداً من النماذج المرجعية ذات الأهمية، والمقدمة أو المطبقة من قبل مؤسسات ومنظمات رائدة في هذا المجال، بهدف تحليل مكوناتها وخصائصها وإجراء مقارنة بينها، وصولاً إلى اقتراح إطار معماري مرجعي مناسب لطبيعة واحتياجات المؤسسات والشركات التابعة لقطاعات الدولة الليبية.

1.2 المعمارية ثلاثية الطبقات [7]

تعد المعمارية ثلاثية الطبقات من أبسط النماذج المعمارية وأكثرها استخداماً في شرح المفهوم الأساسي لإنترنت الأشياء. وتتكون من ثلاث طبقات رئيسية:

أ - طبقة الإدراك (Perception Layer)

تعرف أيضاً باسم الطبقة الفيزيائية في نظام إنترنت الأشياء، وتضم أجهزة الاستشعار والمكونات التي تقوم بجمع البيانات من البيئة المحيطة أو التعرف على الأجهزة الذكية الأخرى. وتشمل هذه الطبقة المستشعرات، وتقنيات التعريف مثل RFID، وغيرها من مكونات جمع البيانات.

ب - طبقة الشبكة (Network Layer)

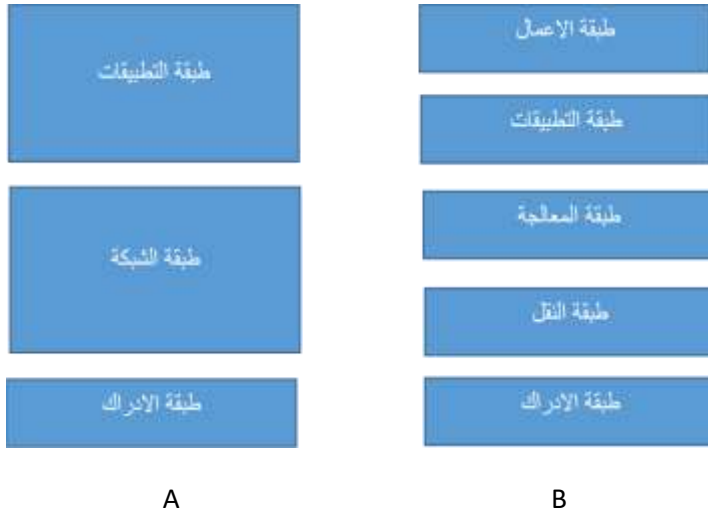
تعمل هذه الطبقة على توفير الاتصال بين أجهزة إنترنت الأشياء، ومكونات الشبكة، والخوادم ومنصات المعالجة. كما تتولى نقل البيانات التي يتم جمعها من أجهزة الاستشعار ومعالجتها أو توجيهها إلى الأنظمة المناسبة.

ت - طبقة التطبيقات (Application Layer)

تختص هذه الطبقة بتقديم الخدمات والتطبيقات النهائية للمستخدمين، وتحدد مجالات استخدام إنترنت الأشياء مثل المنازل الذكية، والمدن الذكية، والرعاية الصحية الذكية، والتطبيقات الصناعية.

دراسة مقارنة وتحليلية للمعماريات المرجعية لإنترنت الأشياء: نحو إطار معماري مناسب للمؤسسات الـبيئية

وعلى الرغم من أن المعمارية ثلاثية الطبقات توضح الفكرة الأساسية لعمل إنترنت الأشياء، إلا أنها لا تغطي بصورة كافية المتطلبات المتقدمة المتعلقة بتحليل البيانات، وإدارة الموارد، والحوسبة الذكية، ولذلك ظهرت نماذج أكثر تفصيلاً مثل المعمارية خماسية الطبقات.



2.2 المعمارية خماسية الطبقات

تعمل المعمارية خماسية الطبقات على تطوير النموذج الثلاثي من خلال إعادة تنظيم الوظائف المعمارية، حيث يتم فصل وظائف الاتصال ونقل البيانات في طبقة النقل، وإضافة طبقات متخصصة لمعالجة البيانات وإدارة الأعمال، بهدف توفير تمثيل أكثر شمولاً لمتطلبات أنظمة إنترنت الأشياء [7]. وتبقى طبقتا الإدراك والتطبيقات محافظتين على

وظائفهما الأساسية في النموذج الثلاثي [7]، بينما تتم إعادة تنظيم الوظائف الأخرى ضمن الطبقات الجديد. وتتكون من:

أ. طبقة النقل (Transport Layer)

تتولى نقل البيانات بين طبقة الإدراك وطبقة المعالجة باستخدام تقنيات اتصال مختلفة مثل الشبكات اللاسلكية، والشبكات الخلوية، وBluetooth، وRFID، وNFC.

ب. طبقة المعالجة (Processing Layer / Middleware Layer)

شكل (1): معمارية إنترنت الأشياء A: ذات 3 طبقات B: ذات 5 طبقات
تعد طبقة المعالجة الوسيطة المسؤولة عن تخزين البيانات وحبيبتها ومعالجتها بعد استيعابها من طبقة النقل. وسحدم بعياب مثل قواعد البيانات، والحوسبة السحابية، وتحليل البيانات الضخمة لتوفير خدمات ذكية ودعم اتخاذ القرار.

ج. طبقة الأعمال (Business Layer)

تهتم بإدارة النظام ككل، وتشمل إدارة الخدمات، وسياسات التشغيل، ونماذج الأعمال، ومتطلبات الأمن والخصوصية، ومراقبة أداء تطبيقات إنترنت الأشياء.

الشكل (1): بنية إنترنت الأشياء (A: ثلاث طبقات) (B: خمس طبقات)

3.2 النموذج المرجعي لمعمارية إنترنت الأشياء ITU-T

نموذج مرجعي مقدم من الاتحاد الدولي للاتصالات (International Telecommunication Union – ITU-T)، ويتكون من أربع طبقات رئيسية، يعد نموذج ITU-T Y.2060 من النماذج المرجعية المعيارية لإنترنت الأشياء. مرتبة من الأسفل إلى الأعلى على النحو الآتي: طبقة الأجهزة (Device Layer)، وطبقة الشبكة (Network Layer)، وطبقة دعم الخدمات والتطبيقات (Service and Application Support Layer)، وأخيراً طبقة التطبيقات (Application Layer) [8]

طبقة الأجهزة (Device Layer): تتولى النقاط البيانات والإشارات من البيئة المحيطة وإرسالها إلى الطبقة التالية، كما تستقبل المعلومات اللازمة لتشغيل الأجهزة، مثل الحساسات والمشغلات. ويمكن أن تتصل الأجهزة بالشبكة بصورة مباشرة، أو بصورة غير مباشرة من خلال بوابات (Gateways)، حيث تقوم هذه البوابات بتجميع البيانات، كذلك تدعم البوابات التنوع في استخدام الحساسات والمشغلات التي تعمل ببروتوكولات اتصال مختلفة، ولا سيما تقنيات الاتصال قصيرة المدى، كما تتيح التكامل مع تقنيات الاتصال بعيدة المدى، مثل أجيال شبكات الهاتف المحمول [5]



طبقة الشبكة (Network Layer): تتولى توفير إمكانات الاتصال ونقل البيانات داخل منظومة إنترنت الأشياء. وتنقسم بصورة أساسية إلى قسمين: قسم التشبيك (Networking)، الذي يتولى التحكم في موارد الوصول والنقل وإدارة عمليات النقل والمصادقة والتحويل والحسابات. قسم النقل (Transport)، الذي يوفر إمكانية نقل بيانات الخدمات والتطبيقات، بالإضافة إلى نقل معلومات التحكم والإدارة المتعلقة بمنظومة إنترنت الأشياء [7].

طبقة دعم الخدمات والتطبيقات (Service and Application Support Layer)

توفر هذه الطبقة مجموعة من القدرات المشتركة والخاصة لدعم تطبيقات إنترنت الأشياء، الأولى قدرات دعم عامة ومشتركة يمكن استخدامها من قبل مختلف تطبيقات إنترنت الأشياء، مثل معالجة البيانات وتخزينها. أما المجموعة الثانية فتتمثل في قدرات دعم خاصة تلبي احتياجات ومتطلبات تطبيقات معينة [9]

شكل (2) : النموذج الـوحي لبنية انترنت الأشياء ITU-T

وتخزينها. أما المجموعة الثانية فتتمثل في قدرات دعم خاصة تلبي احتياجات ومتطلبات تطبيقات معينة [9]

طبقة التطبيقات (Application Layer): تتضمن تطبيقات وخدمات إنترنت الأشياء التي تلبي متطلبات المستخدم النهائي، مثل تطبيقات الزراعة الذكية، والنقل الذكي، والمنازل الذكية، وغيرها من التطبيقات [5][6]

يُصاحب نموذج ITU-T طَبقتان تُعرفان بالطبقات المساعدة، وهما طبقة الإدارة (Management Layer) وطبقة الأمان (Security Layer) وتمتد وظائفهما عبر الطبقات الرئيسية للنموذج [8].

طبقة الإدارة (Management Layer): تتولى إدارة الأخطاء والإعدادات والأداء والموارد والأجهزة، هذه الطبقة تقسم إلى قسمين الأول يشمل إمكانات الإدارة العامة الأساسية حيث يدعم قدرات إدارة أجهزة إنترنت الأشياء من تفعيل أو إلغاء تفعيل للجهاز، تشخيص حالة العمل، تحديث البرمجيات الخاصة، كما تدعم عمليات إدارة حركة البيانات عبر الشبكة. القسم الثاني يرتبط بشكل وثيق ببعض المتطلبات الخاصة بالتطبيقات مثل مراقبة خطوط النقل، متطلبات إدارة التزود بالطاقة بشكل ذكي [8].

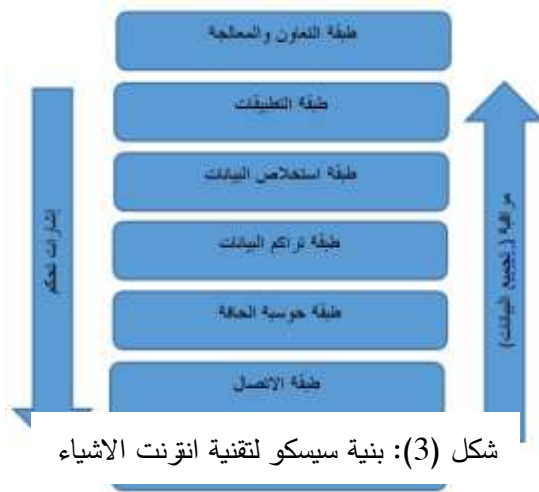
طبقة الامن (Security Layer): توفر قدرات وإمكانات عامة ومخصصة. القدرات الأمنية العامة وظائفها تختلف من طبقة لأخرى، ففي مستوى طبقة التطبيقات الخدمات التي تعرضها الطبقة الأمنية تشمل التحويل والمصادقة وسرية بيانات التطبيق والخصوصية والتدقيق ومكافحة الفيروسات والبرامج الضارة. أما في مستوى طبقة الشبكة فتعمل الطبقة الأمنية على

دراسة مقارنة وتحليلية للمعماريات المرجعية لإنترنت الأشياء: نحو إطار معماري مناسب للمؤسسات الـبيئية

توفير التخويل والمصادقة وسرية بيانات المستخدم، النزاهة وحماية الخصوصية وإرسال إشارات سرية البيانات وموثوقيتها. عند مستوى طبقة الجهاز فتشمل أعمال طبقة الامن قدرات المصادقة والتخويل والتحكم في الوصول والموثوقية وسرية البيانات. قدرات الامن المخصصة ترتبط بشكل وثيق بالمتطلبات الخاصة بالتطبيق على سبيل المثال الدفع عبر الهاتف المحمول[8]

4.2 بنية سيسكو لإنترنت الأشياء Cisco IoT Architecture

تعتمد معمارية سيسكو النموذج الطرفي (Edge Model) المبني على النموذج المرجعي لإنترنت الأشياء (IoT Reference Model) ومستوياته السبعة الموضحة في (الشكل 3). يتخذ تدفق البيانات في هذه المعمارية اتجاهاً ثنائي المحور؛ ففي نمط التحكم والتوجيه، تنتقل "إشارات التحكم" من الطبقات العليا (الطبقة 7) إلى الطبقات السفلى (الطبقة 1)، بينما يسلك تدفق البيانات الاتجاه المعاكس نحو الأعلى في نمط المراقبة وتجميع البيانات[10]



شكل (3): بنية سيسكو لتقنية انترنت الاشياء

في النموذج الخماسي الطبقات، تُقسّم طبقة المعالجة إلى ثلاث طبقات فرعية؛ حيث تتولى طبقة استخلاص البيانات (Data Abstraction Layer) مهمة تجريد وتجميع البيانات المجلوبة من الأجهزة، بينما تختص طبقة الاتصال (Data Communication Layer) بتبادل البيانات وتخزينها، فيما تُجرى المعالجة الفعلية للبيانات ضمن طبقة حوسبة الحافة (Edge Computing Layer).

تتبنى وظائف المستوى الثالث (الخاص بحوسبة الحافة) من الحاجة الماسة لتحويل تدفقات البيانات الشبكية إلى معلومات صالحة للتخزين والمعالجة

المتقدمة في المستوى الرابع الذي يمثل طبقة تراكم البيانات (Data Accumulation)، مما يعني أن أنشطة هذا المستوى تتركز على تحليل البيانات ضخمة الحجم وتحويلها. وعلى سبيل المثال، قد يولد مستشعر في طبقة الأجهزة الفيزيائية والتحكم (الطبقة 1) عينات من البيانات عدة مرات في الثانية الواحدة على مدار الساعة وطوال العام. ورغم هذا الكم الهائل من البيانات المؤلدة، إلا أن أجزاء كبيرة منها لا تخضع للتحليل؛ نظراً لأن العديد من حلول إنترنت الأشياء تتسم ببطء شديد يجعل تحليل تلك البيانات أمراً معقداً. علاوة على ذلك، فإن المعماريات التي تعتمد كلياً على السحابة لإجراء هذا النوع من التحليلات ستواجه تحديات جسيمة في المستقبل بسبب التضخم المفرط في حجم البيانات.

وهنا يأتي النهج المعتمد من قبل شركة سيسكو والمتمثل في "حوسبة الحافة" (Edge Computing) لنقدم حلاً فعالاً لهذه المشكلة عبر إجراء عمليات التقييم والمعالجة في الوقت الفعلي[4]. فعلى سبيل المثال، يُعد النقل المستمر لمقاطع الفيديو الكاملة من كاميرات المراقبة أمراً غير ذي جدوى؛ وبدلاً من ذلك، تُصبح معالجة الفيديو محلياً وإرسال المقاطع المرتبطة برصد أحداث معينة أكثر فاعلية. ومثال آخر يتمثل في أجهزة الصراف الآلي (ATM) عندما تُهيأ للكشف عن المعاملات المالية الاحتيالية في موقعها[4].

من هذا المنطلق، تُروج سيسكو لبواباتها (Gateways) كأجهزة حوسبة طرفية، مُرسيةً بذلك توجهات تقنية جديدة. كما تُتيح الحوسبة الطرفية من سيسكو إمكانية إجراء التحليلات الأولية محلياً قبل توجيه النتائج والتحليلات إلى السحابة عبر طبقة التطبيقات وطبقة

دراسة مقارنة وتحليلية للمعماريات المرجعية لإنترنت الأشياء: نحو إطار معماري مناسب للمؤسسات اللببية

التعاون والمعالجة؛ إذ إن التعامل مع البيانات بالقرب من مصدرها بعد معالجتها أولاً يضمن استمرارية التشغيل والكفاءة حتى في حالات انقطاع الاتصال بالشبكة[4].

5.2 بنية IBM لإنترنت الأشياء

يوضح الشكل (4) البنية المعمارية لإنترنت الأشياء التي قدمتها شركة IBM، والتي تم فيها تكييف بنية الحوسبة السحابية الخاصة بالشركة لتلبية متطلبات تطبيقات إنترنت الأشياء، من خلال مجموعة من التعديلات والإضافات [11]. وتركز هذه البنية بصورة أساسية على البرامج الوسيطة (Middleware)، التي تدعم عمليات الاتصال وإدارة البيانات وتحليلها وإدارة المخاطر، بدلاً من تقديم بنية متكاملة تشمل جميع مكونات منظومة إنترنت الأشياء [4]. وتتكون بنية IBM من أربعة مكونات رئيسية [9]، هي:

الاتصال (Connect): يوفر آليات الاتصال الآمن بين الأجهزة والشبكة، إضافةً إلى تجميع البيانات المستخرجة من الأجهزة وتنظيمها.

إدارة المعلومات (Information Management): تختص بتخزين البيانات وأرشفتها وإدارة تدفقها وتنظيمها، بما يتيح استخدامها في عمليات المعالجة والتحليل.



الشكل (4): بنية IBM لإنترنت الأشياء

التحليل (Analytics): يوفر مجموعة من الأدوات والتقنيات لتحليل البيانات واستخلاص المعلومات والمعرفة منها. وقد صُمم هذا المكون للتعامل مع معدلات مرتفعة من البيانات تصل إلى ملايين السجلات في الثانية، مما يتيح تحليل البيانات الآنية المستخرجة من أجهزة الاستشعار، ودعم عمليات التحليل التنبؤي والمعرفي [4].

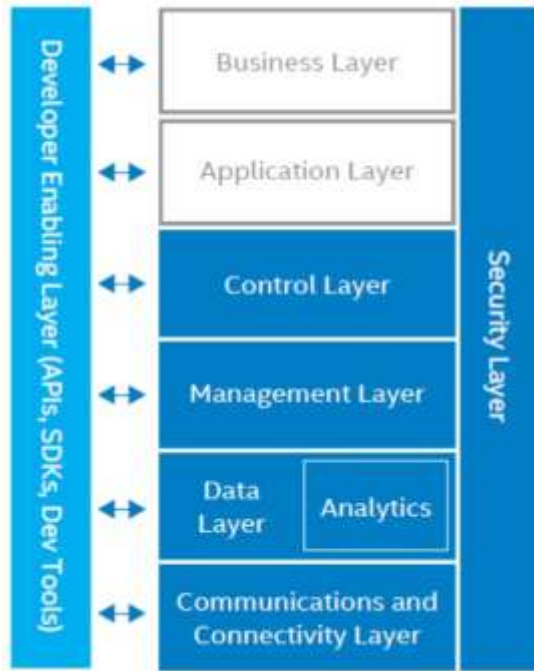
إدارة المخاطر (Risk Management): تهتم بحماية البيانات وإدارة أمن المنظومة، والتحقق من سلامة العمليات، وإدارة تحديثات البرامج الثابتة (Firmware)، ومفاتيح الأمان، وغيرها من الوظائف المرتبطة بإدارة المخاطر الأمنية [4]. وبذلك، تركز بنية IBM على توفير إطار برمجي بسيط يدعم الاتصال وإدارة المعلومات وتحليل البيانات والأمن، بما يساهم في تلبية المتطلبات التشغيلية والأمنية لتطبيقات إنترنت الأشياء [11].

6.2 بنية Intel لإنترنت الأشياء

تتميز بنية مواصفات نظام إنتل (SAS) بإصدارين؛ خُصص الإصدار الأول لمطوري الأنظمة ومكملتها بهدف ربط الأجهزة عبر بوابة إنترنت الأشياء، في حين يتميز الإصدار الثاني بتوجه مستقبلي يسهل إنشاء أنظمة سيبرانية-فيزيائية سلسلة [12].

يوضح الشكل (5) البنية المعمارية لإنترنت الأشياء المقدمة من شركة Intel، وتتميز هذه البنية باعتمادها على نموذج متعدد الطبقات يهدف إلى تنظيم وظائف منظومة إنترنت الأشياء، مع توفير إمكانيات لدعم الاتصال وإدارة البيانات والتحكم والتطبيقات والأعمال، إلى جانب خدمات الأمن ودعم التطوير.

دراسة مقارنة وتحليلية للمعماريات المرجعية لإنترنت الأشياء: نحو إطار معماري مناسب للمؤسسات الـبيئية



شكل (5) بنية إنترنت الأشياء من Intel

تتكون بنية Intel من ثماني طبقات [4]، ست منها طبقات عمودية، تؤدي كل منها مجموعة من الوظائف المحددة، وتوفر مخرجاتها للطبقات الأخرى وفقاً لطبيعة الوظيفة. أما الطبقتان المتبقيتان فهما طبقتان أفقيتان توفران خدماتهما لمختلف الطبقات العمودية وفقاً لاحتياجاتها.

وتتمثل الطبقات العمودية، من الأسفل إلى الأعلى، في:

1. طبقة الاتصال (Communication and Connectivity Layer).
2. طبقة البيانات (Data Layer).
3. طبقة الإدارة (Management Layer).
4. طبقة التحكم (Control Layer).
5. طبقة التطبيقات (Application Layer).
6. طبقة الأعمال (Business Layer).

أما الطبقتان الأفقيتان فهما:

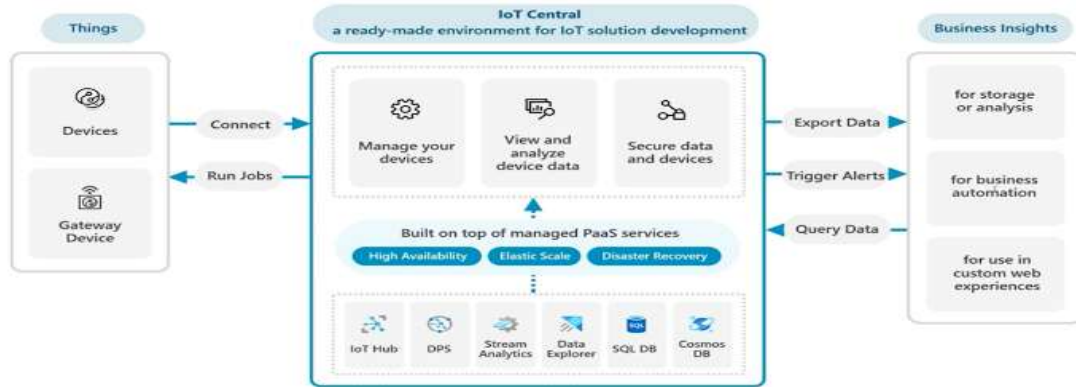
- طبقة الأمان (Security Layer).
- طبقة دعم التطوير (Developer Enabling Layer).

قُسمت البنية إلى مجموعات وظيفية من الطبقات، بحيث ترتبط كل مجموعة بفئة محددة من المستخدمين أو الوظائف. فتضم المجموعة الأولى طبقتي التطبيقات والأعمال، وترتبط بالمستخدمين والخدمات المقدمة لهم. بينما ترتبط طبقة دعم التطوير بمطوري التطبيقات من خلال دعم واجهات برمجة التطبيقات (APIs) وحزم تطوير البرمجيات (SDKs). أما الطبقات الأخرى، فتتعلق بالوظائف التشغيلية وإدارة مكونات المنظومة [12].

وتبرز **طبقة التحكم (Control Layer)** باعتبارها أحد العناصر المهمة في هذه البنية، إذ تمثل طبقة إضافية مقارنةً بنموذج الطبقات السبع، وتدعم فصل وظائف التحكم عن وظائف الإدارة، بما يتيح إدارة الأجهزة والعمليات بصورة أكثر مرونة من خلال واجهات برمجة التطبيقات (APIs). كما تسعى البنية إلى معالجة التحديات المرتبطة بتزايد عدد الأجهزة المتصلة وتنوعها، وما يترتب على ذلك من تحديات في التكامل والتشغيل البيئي للبيانات وأمن المعلومات [4].

7.2 بنية Azure IoT Central لإنترنت الأشياء

يظهر المخطط الهيكلي المقدم من شركة Microsoft بنية لإنترنت الأشياء تُعرف باسم (Azure IoT Central) وتتكون من ثلاثة مستويات رئيسية، هي: مستوى الأشياء (Things)، ومستوى مركز إنترنت الأشياء (IoT Central)، ومستوى رؤية الأعمال (Business Insights) [13].



شكل (6): بنية إنترنت الأشياء في Microsoft Azure IoT Central

مستوى الأشياء (Things): يهتم بالأجهزة والمكونات الفيزيائية التي تتعامل مع البيئة المحيطة، مثل الحساسات التي تتولى النقاط البيانات، والمشغلات التي تنفذ الأوامر والمهام المطلوبة. كما يتضمن هذا المستوى البوابات (Gateways) التي توفر إمكانية الاتصال للأجهزة التي لا تمتلك قدرة مباشرة على الاتصال بالشبكة. ويمكن للبوابات أيضًا تجميع البيانات قبل إرسالها إلى السحابة، أو تنفيذ بعض عمليات المعالجة محليًا عندما تتطلب التطبيقات استجابة سريعة، مثل التعامل مع الحالات غير الطبيعية في البيانات. [13]

مستوى مركز إنترنت الأشياء (IoT Central): يتكون من مجموعة من الوظائف الرئيسية التي تشمل إدارة الأجهزة وبرمجياتها، وتخزين البيانات وتحليلها، ومعالجة البيانات وتحويلها إلى صيغة مناسبة للتطبيقات، بالإضافة إلى وظائف الأمن وحماية الأجهزة والبيانات، بما في ذلك التحكم في الوصول والمصادقة والتحقق. [8]

مستوى رؤية الأعمال (Business Insights): يهتم بالوظائف المرتبطة بالمستخدم وتوظيف البيانات في دعم الأعمال واتخاذ الإجراءات المناسبة. ويشمل ذلك التخزين طويل الأمد وأرشفة البيانات، وتفعيل الإجراءات الخارجية استجابةً لظروف معينة، مثل إرسال تنبيه عند تجاوز درجة الحرارة حدًا معينًا. كما يمكن إثراء بيانات الخدمة بمعلومات إضافية، مثل إضافة معلومات الطقس إلى بيانات الموقع الخاصة بمركبة توصيل، بما يدعم التطبيقات والخدمات المختلفة. [13]

3. المقارنة (المقارنة والتحليل بين المعماريات المرجعية لإنترنت الأشياء)

ان محل الدراسة هو تحديد أوجه التشابه والاختلاف بين المعماريات المرجعية لإنترنت الأشياء، تم إجراء مقارنة تحليلية استنادًا إلى مجموعة من المحاور الوظيفية والمعمارية التي تمثل مكونات أساسية في بناء منظومات إنترنت الأشياء. وتشمل هذه المحاور: البنية الطبقية، وإدارة الأجهزة، والحوسبة الطرفية، وإدارة البيانات، والتحليلات، والأمن، والتشغيل البيئي، وقابلية التوسع. ويهدف هذا التحليل إلى تحديد الخصائص والوظائف المشتركة بين المعماريات المدروسة، إلى جانب إبراز الجوانب التي تحظى باهتمام أكبر في بعض المعماريات مقارنة بغيرها، تمهيدًا لاستخلاص الأولويات والمتطلبات المعمارية المناسبة للبيئة الـبيئية.

محور المقارنة	ITU-T	Cisco	IBM	Intel	Microsoft
البنية الطبقية	✓	✓	جزئيًا	✓	✓
إدارة الأجهزة	✓	✓	✓	✓	✓
الحوسبة الطرفية	—	✓	—	—	✓
إدارة البيانات	✓	✓	✓	✓	✓
التحليلات	✓	✓	✓	✓	✓
الأمن وإدارة المخاطر	✓	✓	✓	✓	✓
التشغيل البيئي	✓	✓	✓	✓	✓
قابلية التوسع	✓	✓	✓	✓	✓
فصل وظائف الإدارة والتحكم	—	✓	✓	✓	✓

يلاحظ من المقارنة أن المعماريات المرجعية المدروسة تتفق في دعم مجموعة من الوظائف الأساسية لمنظومات إنترنت الأشياء، إلا أنها تختلف في درجة التركيز على هذه الوظائف وطريقة تنظيمها ضمن البنية المعمارية. فبينما تركز معمارية ITU-T بصورة أساسية على التنظيم الطبقي والوظيفي لمنظومة إنترنت الأشياء، تبرز في معمارية Cisco أهمية الحوسبة الطرفية ومعالجة البيانات بالقرب من مصادرها. في المقابل، تركز معمارية IBM على إدارة المعلومات والبيانات والتحليلات، إلى جانب الجوانب المرتبطة بالأمن وإدارة المخاطر. كما تعكس معمارية Intel اهتمامًا واضحًا بالتشغيل البيئي وقابلية التوسع وتنظيم وظائف الإدارة والتحكم، في حين تجمع معمارية مايكروسوفت بين إدارة الأجهزة وإدارة البيانات والتحليلات والخدمات السحابية، مع دعم المعالجة المحلية.

من خلال المقارنة، يمكن ملاحظة أن عددًا من الوظائف يتكرر في معظم المعماريات المدروسة، وفي مقدمتها إدارة الأجهزة، وإدارة البيانات، والأمن، والتشغيل البيئي، وقابلية التوسع، مما يشير إلى أن هذه الوظائف تمثل مكونات أساسية في بناء منظومات إنترنت الأشياء. وفي المقابل، تظهر بعض الوظائف بدرجة تركيز أكبر في معماريات معينة، مثل الحوسبة الطرفية

دراسة مقارنة وتحليلية للمماريات المرجعية لإنترنت الأشياء: نحو إطار معماري مناسب للمؤسسات اليبية

في Cisco ، والتحليلات وإدارة المعلومات في IBM ، والاهتمام بفصل وظائف الإدارة والتحكم في عدد من المماريات، ومن أبرزها Intel ، وهو ما يعكس اختلاف التوجهات الممارية وفقاً للأهداف والبيئات التي صممت من أجلها هذه المماريات.

بناءً على نتائج المقارنة والتحليل، يمكن استخلاص مجموعة من الوظائف والخصائص التي تمثل عناصر مشتركة وأساسية في معظم المماريات المرجعية المدروسة، وفي مقدمتها إدارة الأجهزة، وإدارة البيانات، والأمن، والتشغيل البيئي، وقابلية التوسع، إلى جانب الحوسبة الطرفية والتحليلات باعتبارهما من الوظائف التي تزداد أهميتهما في البيئات التي تتطلب معالجة البيانات بالقرب من مصادرها والاستفادة منها في الوقت المناسب. ولا يعني تكرار هذه الوظائف في المماريات المدروسة أنها تتمتع بالأولوية نفسها في جميع البيئات، إذ تختلف أهمية كل وظيفة وفقاً لطبيعة المؤسسة ومتطلباتها، والبنية التحتية المتاحة، والقيود التشغيلية والتقنية. ومن ثم، فإن الانتقال إلى بناء إطار معماري ملائم للبيئة اليبية يتطلب تحديد أولويات هذه الوظائف، ثم مواءمتها مع طبيعة التحديات والاحتياجات المتوقعة لدى المؤسسات اليبية.

كما تشير هذه النتائج إلى أن بناء إطار معماري ملائم للبيئة اليبية لا يتطلب تبني إحدى المماريات المرجعية بصورة كاملة، وإنما الاستفادة من الخصائص والوظائف التي أثبتت المقارنة أهميتها، مع إعطاء الأولوية للوظائف الأكثر ارتباطاً باحتياجات المؤسسات وطبيعة بيئتها التشغيلية.

1.3 استخلاص المتطلبات المناسبة للبيئة اليبية

استناداً إلى نتائج المقارنة والتحليل بين المماريات المرجعية العالمية، ونظراً لطبيعة التحديات التشغيلية والتقنية المحتملة في المؤسسات اليبية، مثل تفاوت استقرار شبكات الاتصالات، وتباين جاهزية البنية التحتية الرقمية، والحاجة إلى حماية البيانات والأنظمة المؤسسية، يتطلب بناء إطار معماري ملائم للبيئة اليبية تحديد مجموعة من المتطلبات الممارية ذات الأولوية، بدلاً من التطبيق الكامل لممارية مرجعية واحدة.

وتتحدد المتطلبات الممارية الأساسية للبيئة اليبية في المحاور التالية:

الاعتماد على الحوسبة الطرفية (Edge Computing):

المطلب: اعتماد قدرات معالجة وتحليل محلية بالقرب من مصادر البيانات والأجهزة، بما يسمح بتنفيذ العمليات الأساسية واتخاذ القرارات الأولية دون الاعتماد الكامل على الاتصال المستمر بالخدمات السحابية، مع إمكانية مزامنة البيانات مع المنصة المركزية عند توفر الاتصال.

الدوافع والتحديات الميدانية: يساهم هذا المتطلب في التعامل مع تفاوت جودة واستقرار شبكات الاتصالات، ولا سيما في المواقع الجغرافية البعيدة أو المنشآت التي تتطلب استمرار العمليات التشغيلية. كما يساعد على تقليل حجم البيانات المنقولة عبر الشبكات، وخفض استهلاك النطاق الترددي، وتحسين زمن الاستجابة للتطبيقات التي تتطلب معالجة فورية أو شبه فورية.

إدارة الأجهزة المتقدمة والمستقلة (Device Management):

دراسة مقارنة وتحليلية للمماريات المرجعية لإنترنت الأشياء: نحو إطار معماري مناسب للمؤسسات اليبية

المطلب: توفير آليات مركزية لإدارة الأجهزة ومراقبة حالتها التشغيلية، وإجراء عمليات التهيئة والتحديث البرمجي عن بُعد (OTA)، واكتشاف الأعطال والتنبيه عنها، بما يقلل الحاجة إلى التدخل الميداني المتكرر.

الدوافع والتحديات الميدانية: وجود أجهزة ومواقع تشغيلية متباعدة جغرافياً، وما قد يترتب على ذلك من صعوبة الوصول المستمر إليها لإجراء الصيانة أو التحديثات، مما يجعل الإدارة المركزية والقدرة على المراقبة عن بُعد من المتطلبات المهمة لاستمرارية منظومة إنترنت الأشياء.

الأمن والحماية الشاملة (Cybersecurity & Risk Management):

المطلب: اعتماد آليات أمنية متعددة المستويات تشمل حماية الأجهزة والاتصالات والمنصات والبيانات، وتطبيق مبادئ التحكم في الوصول والتحقق المستمر من الهوية، مع تشفير البيانات أثناء النقل والتخزين، وفصل شبكات التحكم عن شبكات البيانات عند الحاجة.

الدوافع والتحديات الميدانية: حماية الأنظمة والبيانات المؤسسية والبنى التحتية الحيوية من الوصول غير المصرح به والهجمات السيبرانية، والحد من آثار الاختراقات المحتملة، مع مراعاة متطلبات حماية البيانات والخصوصية في المؤسسات اليبية.

التشغيل البيني والمعايير المفتوحة (Interoperability & Open Standards):

المطلب: دعم البروتوكولات والمعايير المفتوحة المناسبة لبيئة إنترنت الأشياء، مثل MQTT و CoAP و OPC UA، بما يسمح بربط الأجهزة والمنصات والأنظمة المختلفة وتبادل البيانات بينها دون الاعتماد على مورد أو تقنية واحدة.

الدوافع والتحديات الميدانية: إمكانية وجود معدات وأنظمة قديمة (Legacy Systems) إلى جانب الأنظمة الحديثة داخل المؤسسات الصناعية والخدمية، الأمر الذي يتطلب القدرة على دمج الأنظمة القائمة مع الحلول الجديدة وتقليل الحاجة إلى استبدال البنية التحتية بصورة شاملة.

قابلية التوسع والمرونة المعمارية (Scalability & Modular Architecture):

المطلب: اعتماد بنية معمارية معيارية ومرنة تسمح بالتوسع التدريجي في عدد الأجهزة وحجم البيانات والخدمات، مع إمكانية إضافة مكونات أو وظائف جديدة دون إعادة بناء المنظومة بالكامل.

الدوافع والتحديات الميدانية: تمكين المؤسسات من البدء بمشروعات محدودة النطاق أو تجريبية، ثم توسيعها تدريجياً وفق مستوى الجاهزية التقنية وتوفر الموارد والميزانيات، بما يقلل مخاطر الاستثمار الأولي ويدعم التحول التدريجي نحو منظومات إنترنت الأشياء.

فصل وظائف الإدارة والتحكم عن البيانات (Control & Management Separation):

المطلب: تنظيم مسارات البيانات (Data Plane) الناتجة عن أجهزة الاستشعار ومصادر البيانات بصورة مستقلة عن مسارات الإدارة والتحكم (Control Plane)، بما يسمح بإدارة الأجهزة والسياسات والتحديثات دون التأثير غير الضروري في تدفق البيانات والعمليات الأساسية.

دراسة مقارنة وتحليلية للمعماريات المرجعية لإنترنت الأشياء: نحو إطار معماري مناسب للمؤسسات اليبية

الدوافع والتحديات الميدانية: يسهم في عزل وظائف الإدارة والسياسات عن تدفق البيانات التشغيلية، ويحد من تأثير العمليات الإدارية على حركة البيانات، مع الحفاظ على استمرارية العمليات التشغيلية.

4. الخاتمة

تناولت هذه الدراسة مقارنة وتحليل عدد من المعماريات المرجعية لإنترنت الأشياء، بهدف التعرف على أوجه التشابه والاختلاف بينها، وتحديد أهم الوظائف والخصائص المعمارية التي يمكن أن تكون ذات صلة باحتياجات المؤسسات اليبية. وقد شملت المقارنة خمس معماريات مرجعية هي ITU-T و Cisco و IBM و Intel و Microsoft، بالاستناد إلى مجموعة من المحاور الوظيفية والمعمارية، من أبرزها البنية الطبقية، وإدارة الأجهزة، والحوسبة الطرفية، وإدارة البيانات، والتحليلات، والأمن وإدارة المخاطر، والتشغيل البيئي، وقابلية التوسع، وفصل وظائف الإدارة والتحكم.

أظهرت نتائج المقارنة وجود مجموعة من الوظائف المشتركة التي تحظى باهتمام واسع في مختلف المعماريات المرجعية، وفي مقدمتها إدارة الأجهزة، وإدارة البيانات، والأمن، والتشغيل البيئي، وقابلية التوسع، مع اختلاف درجة التركيز على هذه الوظائف وطريقة تنظيمها من معمارية إلى أخرى.

أظهرت الدراسة أهمية بعض الوظائف بصورة أكثر وضوحًا في معماريات محددة، ومن أبرزها الحوسبة الطرفية والتحليلات وفصل وظائف الإدارة والتحكم. وبناءً على نتائج التحليل، تم استخلاص مجموعة من المتطلبات التي يمكن أن تمثل أولويات معمارية عند تطبيق منظومات إنترنت الأشياء في المؤسسات اليبية، وتشمل الاعتماد على الحوسبة الطرفية، وإدارة الأجهزة عن بُعد، وتعزيز الأمن وإدارة المخاطر، ودعم التشغيل البيئي والمعايير المفتوحة، واعتماد بنية مرنة قابلة للتوسع، إضافة إلى فصل وظائف الإدارة والتحكم عن تدفق البيانات التشغيلية.

كما تشير الدراسة إلى أن الاستفادة من المعماريات المرجعية العالمية لا ينبغي أن تقوم على تبني معمارية واحدة بصورة كاملة، وإنما على تحليل خصائصها ووظائفها واختيار ما يتناسب مع طبيعة البيئة التشغيلية والتقنية للمؤسسات المستهدفة. ومن ثم، فإن المتطلبات المستخلصة في هذه الدراسة تمثل أساسًا تحليليًا يمكن الاستفادة منه في توجيه مشاريع إنترنت الأشياء في المؤسسات اليبية، كما يمكن أن تشكل نقطة انطلاق لدراسات مستقبلية تتناول تطوير أطر معمارية أكثر تخصصًا وتقييمها ميدانيًا وفق طبيعة القطاعات والمؤسسات المختلفة.

5. التوصيات

استنادًا إلى نتائج المقارنة والتحليل، توصي الدراسة بما يلي:

1. اعتماد الحوسبة الطرفية ضمن مشاريع إنترنت الأشياء: تُوصى بإعطاء الحوسبة الطرفية أولوية في التطبيقات التي تتطلب استجابة سريعة أو استمرارًا في العمل عند ضعف أو انقطاع الاتصال، مع الاستفادة من الحوسبة السحابية في تخزين البيانات ومعالجتها على المستوى المركزي.

دراسة مقارنة وتحليلية للمعماريات المرجعية لإنترنت الأشياء: نحو إطار معماري مناسب للمؤسسات الليبية

2. تعزيز قدرات إدارة الأجهزة عن بُعد: تُوصى بتوفير منصات وآليات مركزية لإدارة أجهزة إنترنت الأشياء ومراقبة حالتها التشغيلية، ودعم التحديثات البرمجية عن بُعد، بما يقلل الحاجة إلى التدخل الميداني ويعزز استمرارية التشغيل.
3. إعطاء الأمن وإدارة المخاطر أولوية منذ مرحلة التصميم: ينبغي تضمين متطلبات الأمن والحماية في مختلف مكونات منظومات إنترنت الأشياء، بما يشمل الأجهزة والاتصالات والمنصات والبيانات، مع تطبيق آليات مناسبة للتحكم في الوصول والتشفير وحماية البيانات.
4. اعتماد المعايير المفتوحة ودعم التشغيل البيني: تُوصى باستخدام البروتوكولات والمعايير المفتوحة المناسبة، بما يتيح التكامل بين الأجهزة والأنظمة والمنصات المختلفة، ويحد من الارتباط بمورد أو تقنية واحدة، ويساعد المؤسسات على دمج الأنظمة القائمة مع الحلول الحديثة.
5. تبني التوسع التدريجي والبنى المعمارية المرنة: تُوصى بتنفيذ مشاريع إنترنت الأشياء بصورة تدريجية تبدأ بتطبيقات محدودة النطاق، مع اعتماد بنى معيارية قابلة للتوسع وإضافة الأجهزة والخدمات مستقبلاً وفق مستوى الجاهزية التقنية وتوفر الموارد.
6. إجراء دراسات ميدانية قطاعية: تُوصى الدراسة بإجراء دراسات مستقبلية تختبر هذه المتطلبات في قطاعات ليبية مختلفة، مثل الطاقة والمياه والصناعة والاتصالات والخدمات العامة، بهدف تحديد الأولويات الخاصة بكل قطاع وتقييم مدى ملاءمة المعماريات المرجعية المختلفة للظروف التشغيلية الفعلية.
7. تُوصى بإجراء دراسات مستقبلية تتوسع في مراجعة الأطر المعيارية الدولية والتخصصية، وعلى رأسها المعمارية المرجعية لمنظمة مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (IEEE 2413) ومعمارية تحالف إنترنت الأشياء الصناعي (IIC IIRA)، بهدف تقييم مدى ملاءمتها للقطاعات الحيوية والصناعية الدقيقة في البيئة المحلية، مثل قطاع النفط والغاز والكهرباء

قائمة المراجع:

- [1] M. M. M. Alkharsh, H. K. H. Mohamed, A. A. Muftah, F. M. Hassan, and N. M. Abdulmjid, "From Digital Fragmentation to Digital State Capacity: Institutional, Regulatory, and Infrastructural Conditions for Digital Government Transformation in Libya," *Scientific Journal for Publishing in Health Research and Technology*, vol. 2, no. 3, pp. 113–122, 2026.
- [2] I. Alsharif, H. E. Hebrisha, and A. A. Ahmed, "A comprehensive review towards Libyan smart cities," *African Journal of Advanced Pure and Applied Sciences (AJAPAS)*, vol. 2, no. 3, pp. 15–22, Jul.–Sep. 2023.
- [3] A. O. Abomandel, "Applications of Internet of Things in Smart Cities: Bani Walid City as a Model," *International Research Journal of Management and Social Sciences*, vol. VI, no. 2, Apr.–Jun. 2025.

- [4] M. Gokilavani, B. Ashin, K. N. Unnikrishnan, V. Sunder, and B. V. Ajay, "A study on IoT architecture for IoT application domains," *International Journal of Innovative Research in Information Security*, vol. 6, no. 4, pp. 102–107, 2019.
- [5] N. N. Dattani and G. Bhimani, "A review paper on the Internet of Things (IoT) and its architecture," *Journal of the Maharaja Sayajirao University of Baroda*, vol. 55, no. 1, pp. 15–19, 2021.
- [6] N. M. Masoodhu Banu and C. Sujatha, "IoT architecture: A comparative study," *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, vol. 117, no. 8, pp. 45–49, 2017.
- [7] R. Sethi and S. R. Sarangi, "Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications," *Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 2017, Art. no. 9324035, pp. 1–25, 2017, doi: 10.1155/2017/9324035.
- [8] International Telecommunication Union, Recommendation ITU-T Y.2060: *Overview of the Internet of Things*. Geneva, Switzerland: ITU-T, Jun. 2012.
- [9] J. Gubbi, R. Buyya, S. Marusic, and M. Palaniswami, "Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions," *Future Generation Computer Systems*, vol. 29, no. 7, pp. 1645–1660, 2013.
- [10] Cisco Systems, Inc., "The Internet of Things Reference Model," *White Paper*, 2014.
- [11] M. Laroui, B. Nour, H. Moun gla, M. A. Cherif, H. Affi, and M. Guizani, "Edge and fog computing for IoT: A survey on current research activities & future directions," *Computer Communications*, vol. 180, pp. 210–231, 2021, doi: 10.1016/j.comcom.2021.09.003.
- [12] Intel Corporation, "The Intel IoT Platform: Architecture Specification," *White Paper*, 2015.
- [13] Microsoft, "Azure IoT Central architecture ", *Microsoft Learn* .2025 ,[Online]. Available : <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/iot-central/core/concepts-architecture>