

IoT ve AIoT'ye Giriş: Kavramlar, Mimari Yaklaşımlar ve Uygulama Alanları

Ahmet Özmen¹

Özet

Bu bölümde Nesnelerin İnterneti (IoT) ve Nesnelerin Yapay Zekâsı (AIoT) kavramları, temel bileşenleri, mimari yaklaşımları ve başlıca kullanım senaryoları bütüncül bir çerçevede ele alınmıştır. IoT, sensörler ve ağ altyapısı aracılığıyla fiziksel dünyadan veri toplayan, bu veriyi ileten ve uygulama katmanında hizmete dönüştüren bir ekosistem olarak tanımlanmış; akıllı ev, sağlık, tarım, çevre izleme, ulaşım, akıllı şehirler ve endüstri gibi alanlarda sunduğu katkılar vurgulanmıştır. IoT'nin hızla artan veri üretimi ve gerçek zamanlı karar ihtiyacı nedeniyle yapay zekâ ile bütünleşerek AIoT'ye evrildiği açıklanmıştır. AIoT'nin, veriyi yalnızca iletmek yerine analiz eden ve yerel düzeyde çıkarım üreten bir yapı sunduğu; ancak bunun hesaplama yükü, depolama gereksinimi ve veri güvenliği gibi zorlukları da beraberinde getirdiği belirtilmiştir. IoT'nin mimarisinde üç katmanlı yaklaşım temel alınmış, bulut bilişim ve uç bilişimin rolü gecikme, bant genişliği ve performans gereksinimleri bağlamında tartışılmıştır. AIoT mimarisinde ise uç-bulut düzeyinden buluta uzanan katmanlı yapı açıklanmıştır. Bulut tabanlı ve uç-bulut iş birliğine dayalı paradigmlar karşılaştırılmıştır. Son olarak günümüzde AIoT'nin, otomasyondan öte kestirim, uyarlama ve optimizasyon kapasitesini artırmasında katkı sağlamasının yanı sıra TinyML, federatif öğrenme, dijital ikiz ve uça görüntü işleme gibi yeni yaklaşımların uygulama alanı olmuştur.

1. Giriş

Bu bölüm, Nesnelerin İnterneti (Internet of Things, IoT) ve Nesnelerin Yapay Zekâsı (Artificial Intelligence of Things, AIoT) kavramlarını kavramsal temelleri, mimari yaklaşımları ve uygulama bağlamları üzerinden sistematik biçimde ele almayı amaçlamaktadır. Öncelikle IoT'nin tanımı,

1 Dr. Öğretim Üyesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, ahmetozmen@ktu.edu.tr, 0000-0002-3631-4883

temel bileşenleri ve farklı sektörlerdeki kullanım örüntüleri açıklanmakta; ardından IoT ekosisteminde üretilen verinin hacim ve karmaşıklığının artmasıyla birlikte yapay zekâ yöntemlerinin bu yapılara nasıl entegre olduğu ve AIoT'nin hangi gereksinimlere yanıt verdiği tartışılmaktadır. Daha sonra IoT ve AIoT mimarileri incelendi ve endüstriyel otomasyondan (Industry 4.0) akıllı şehirlere, sağlık hizmetlerinden akıllı tarıma kadar uzanan geniş bir yelpazedeki çeşitli kullanım senaryoları üzerinden AIoT sistemlerinin sağladığı katkı ve verimlilik artışları bilimsel bir bakış açısıyla özetlenmektedir.

1.1. Nesnelerin İnterneti (IoT)

IoT, fiziksel nesnelerin birbirine bağlanması, çevrelerinden veri toplayabilmesi, bu verileri iletebilmesi ve diğer sistemlerle etkileşim kurabilmesi esasına dayanan bir kavramdır. Literatürde 1999'dan itibaren kavramsal bir çerçeve kazanan IoT, günümüzde farklı sektörlerdeki yaygın uygulamalarıyla gündelik yaşamın ve endüstriyel süreçlerin temel bileşenlerinden biri hâline gelmiştir (Berte, 2018; Gubbi et al., 2013). Kendine özgü bir ekosistem oluşturan IoT, hem endüstriyel hem de tüketici pazarlarında geniş bir etki alanına sahip olup, dijital ve fiziksel dünya arasında kesintisiz bir veri ve hizmet akışı üretmektedir (Chakroun et al., 2022; Madakam et al., 2015).

IoT ekosistemi temelde sensörler, veri toplama sistemleri ve ağ bağlantılarından oluşur (Kabalcı et al., 2019). Bu bileşenler sayesinde nesneler fiziksel çevreyi izleyebilir, ham veriyi toplayıp iletebilir ve veri işleme süreçleri aracılığıyla belirli karar mekanizmalarını tetikleyebilir. Örneğin akıllı ev sistemleri, kullanıcıların enerji tüketimini izleyerek optimizasyonu destekler ve ev otomasyonunu daha işlevsel hâle getirir (Li, 2024). Özellikle veri analitiği ve yapay zekâ ile bütünleşen IoT uygulamaları, karmaşık veri akışlarını anlamlandırarak daha güvenilir, uyarlanabilir ve bağlam duyarlı çözümlerin geliştirilmesine katkı sunmaktadır (DeMedeiros et al., 2023).

Son yıllardaki çalışmalar, IoT'nin çevre izleme, sağlık hizmetleri, ulaşım, tarım, arıza tespiti ve üretim gibi çok çeşitli alanlara entegre edilebilen kritik bir teknoloji olduğunu ortaya koymaktadır (Awaisi et al., 2020; Elijah et al., 2018; Lodhi et al., 2025; Misra et al., 2018; Jun Zhang et al., 2020). Bu alanlar içinde tarımsal uygulamalar, IoT'nin somut faydalarının belirginleştiği örneklerden biridir. Akıllı sensör teknolojileri ile görüntü işleme sistemlerinin bütünleştirilmesi; gerçek zamanlı zararlı tespiti, otomatik sulama kontrolü ve karar destek mekanizmalarının kurulmasını mümkün kılmakta; böylece verimliliği artırırken sürdürülebilir uygulamaların yaygınlaşmasına katkı sağlamaktadır (Miller et al., 2025). Benzer biçimde, akıllı tarım senaryoları

üretim süreçlerinin izlenebilirliğini artırarak optimizasyon yaklaşımlarının uygulanmasını kolaylaştırmaktadır (Awaisi et al., 2024).

Sağlık alanında IoT, özellikle Tıbbi Nesnelerin İnterneti (Internet of Medical Things, IoMT) kapsamında; sağlık izleme cihazları ve hasta takip sistemleri gibi uygulamalar üzerinden hizmetlerin etkinliğini artırmaktadır (Joyia et al., 2017; Rajab et al., 2024). IoT tabanlı izleme çözümleri veri toplama ve analiz süreçlerini hızlandırarak hizmet kalitesini iyileştirebilse de, güvenlik ve mahremiyet riskleri bu alanda öne çıkan temel zorluklar arasında yer almaktadır (Ande et al., 2020; Sahu & Mazumdar, 2024).

IoT'nin belirgin etkilerinin gözlendiği bir diğer alan akıllı şehir uygulamalarıdır. Sensör ağları ve veri analitiği aracılığıyla trafik yönetimi, atık yönetimi ve enerji verimliliği gibi konularda iyileştirmeler sağlanmakta; böylece kentlerin daha yaşanabilir ve sürdürülebilir biçimde yönetilmesi desteklenmektedir (Kamarudin et al., 2023). Akıllı şehir uygulamaları, şehirlerin daha yaşanabilir ve sürdürülebilir hale gelmesine katkıda bulunmaktadır. Ulaşım ve lojistik alanında da IoT uygulamaları önemli ölçüde etkili olmaktadır. Bu teknoloji, taşıma süreçlerini otomatikleştirerek zaman kazanımına ve maliyetlerin azaltılmasına olanak tanımaktadır. Araçların ve taşıma sistemlerinin IoT ile entegre edilmesi, sürdürülebilir bir erişim sağlamaktadır (Dwivedi et al., 2021). Aynı şekilde, çevresel izleme uygulamaları da IoT'nin sağladığı imkanlarla daha etkin bir hale gelmektedir. Sensörler aracılığıyla hava kirliliği, hava durumu ve su kalitesi gibi verilere ulaşarak, çevresel yönetimi geliştirmektedir (Katie, 2024).

Günümüz endüstride IoT, ekipman performansının izlenmesi, arıza risklerinin önceden belirlenmesi ve üretim süreçlerinin daha otonom bir yapıya taşınması açısından kritik bir rol üstlenmektedir. IoT cihazları endüstriyel süreçleri izlenebilir kılarak optimizasyonu destekler, insan müdahalesini azaltır ve maliyetleri düşürmeye yönelik karar mekanizmalarını güçlendirir. Bu bağlamda endüstriyel IoT uygulamaları, Endüstriyel Nesnelerin İnterneti (Industrial Internet of Things, IIoT) olarak adlandırılan bir alanın gelişimini hızlandırmıştır. Endüstri 4.0 yaklaşımı, imalat süreçlerinde otomasyon ve dijitalleşmeye odaklanırken IIoT, bu dönüşümün temel teknolojilerinden biri olarak konumlanmaktadır (Awaisi et al., 2024; Jamwal et al., 2021).

Bununla birlikte IoT ağları için güvenlik, gizlilik ve veri yönetimi gibi zorlukları da önemli hale gelmiştir. IoT sistemleri yoğun veri akışını yöneten ve analiz eden dağıtık ağlar olarak çalışması saldırılara karşı önlemler alınmasını zorunlu hale getirmiştir. Sonuç olarak IoT'nin sunduğu inovasyon ve verimlilik fırsatlarını değerlendirirken aynı zamanda güvenliğin

güçlendirilmesi ve veri yönetimini düzenlenmesi gerekmektedir (Sahu & Mazumdar, 2024).

1.2. Nesnelerin Yapay Zekası (AIoT)

IoT'nin hızlı gelişimi ve bağlı cihazların ürettiği verinin hacim, çeşitlilik ve hız bakımından artmasından dolayı IoT sistemlerinin yalnızca veri toplama ve iletimle sınırlı kalmayıp, veriyi işleyerek daha doğru ve kapsamlı kararlar üreten yapılara dönüşmesini gerekli kılmıştır. Bu gereksinim doğrultusunda, IoT ekosistemini veri işleme, analiz ve karar verme yetenekleriyle güçlendirmek amacıyla yapay zekâ (YZ) algoritmalarının IoT sistemlerine entegrasyonu gündeme gelmiştir. IoT tarafından üretilen büyük ölçekli veriler, aynı zamanda YZ modellerinin eğitimi için önemli bir fırsat alanı sunarak akıllı hizmet üretimini hızlandırmaktadır. Yapay zekâ ve IoT'nin bütünleştiği bu yaklaşım, AIoT olarak adlandırılmakta; akıllı elektrik şebekeleri, ulaşım sistemleri ve akıllı şehirler gibi alanlarda dikkat çekici uygulama başarılarıyla rapor edilmektedir (Derawi et al., 2020; Rahman et al., 2023; Shen et al., 2023).

AIoT'nin temel avantajı, YZ algoritmalarının (özellikle derin öğrenme temelli yaklaşımların) IoT verisini eyleme dönüştürülebilir içgörülere çevirerek daha isabetli analiz ve karar üretimini mümkün kılmasıdır. Bununla birlikte, YZ'nin hesaplama maliyeti ve depolama gereksinimi, AIoT sistem tasarımında kritik bir sınırlılık alanı oluşturmaktadır. Bu noktada dağıtık öğrenme yaklaşımları, veriyi ve modelleri farklı uç cihazlara dağıtarak tek bir sistem üzerindeki hesaplama ve depolama baskısını azaltmada önemli bir rol oynamaktadır (Xu, Seng, Ang, et al., 2024).

AIoT, yapay zekâ teknolojileri ile IoT sistemleri arasında iş birliğine dayalı bir ekosistem olarak değerlendirilebilir. IoT, AIoT'nin altyapısını oluşturarak sensör verilerinin toplanmasını, veri kaynaklarının sürekliliğini ve sistemin uçtan uca işlemlerini sağlar. Yapay zekâ ise bu ekosistemin analiz ve karar verme çekirdeğini oluşturarak büyük veri kümelerinden anlamlı örüntüleri ve potansiyel bilgileri çıkarır. Bu çerçevede AIoT'nin ana mimari kurgusu, IoT temelli veri toplama ve iletişim katmanları üzerine inşa edilmektedir.

Güncel çalışmalar, AIoT çerçevelerinin farklı sensörlerden gelen ham veriyi gelişmiş veri analitiği ve makine öğrenmesi teknikleriyle işleyerek IoT operasyonlarını iyileştirdiğini, süreç verimliliğini ve otomasyonu artırdığını ve kullanıcı deneyimlerini ile operasyonel çıktıları zenginleştirdiğini vurgulamaktadır (Barkani et al., 2024; Knez et al., 2021; Wazid et al., 2021). Bu eğilim, yapay zekâ yeteneklerinin doğrudan uç cihazlara entegre edilmesini de öne çıkarmaktadır. Uçta karar verme, merkezi sistemlere

bağımlılığı azaltarak daha düşük gecikme ve daha yüksek bağlam duyarlılığı sağlayabilmektedir.

AIoT literatüründe öne çıkan bir diğer yönelim, TinyML gibi hafif makine öğrenimi yaklaşımlarının kullanımıdır. Bu yaklaşımlar, düşük güçlü mikrodenetleyiciler üzerinde model çalıştırmayı mümkün kılarak gerçek zamanlı çıkarımı uçta gerçekleştirerek gecikme ve enerji tüketimini azaltmaya katkı sunmaktadır (Barkani et al., 2024; Xia & Hu, 2025). Buna ek olarak federatif öğrenme, ham veriyi paylaşmadan merkezi olmayan cihazlar arasında model eğitimi yapılmasını destekleyerek gizlilik ve veri güvenliği açısından önemli bir potansiyel taşıdığını göstermiştir (Fu et al., 2024; Jing Zhang & Tao, 2021). AIoT ekosistemi geliştikçe, farklı endüstrilerde sürdürülebilir ve ölçeklenebilir çözümlerde beraberinde gelişmektedir. Bu durum hem araştırmacılar hem de uygulayıcılar için yeni fırsat alanları doğurmaktadır (Adli et al., 2023; Xu, Seng, Smith, et al., 2024; Yan, 2024)

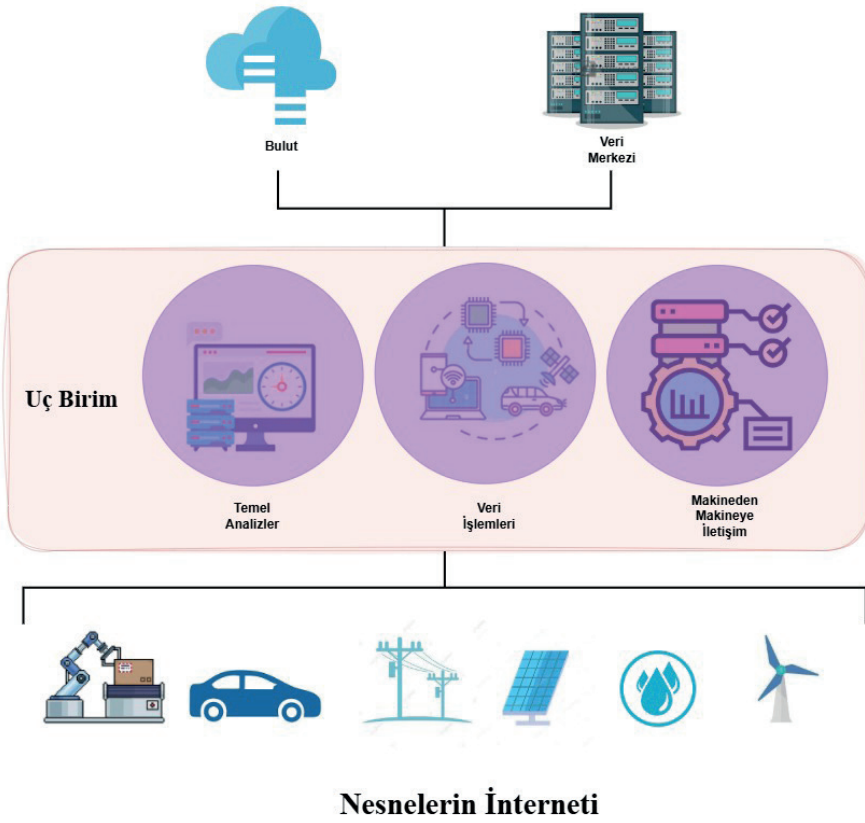
2. IoT Mimarisi

IoT, fiziksel nesnelerin küresel bir ağ üzerinden birbirine bağlanmasını sağlayarak dijital ve fiziksel dünya arasında sürekli bir veri ve hizmet akışı kurar. IoT mimarisinin kavramsal evrimi literatürde genellikle üç temel nesil üzerinden açıklanmaktadır:

Birinci Nesil: etiketli nesneler ve RFID tabanlı tanımlayıcılar ile makineden makineye (M2M) iletişimin öne çıktığı dönem (Khalid, 2021).

İkinci Nesil: iletişimin ve verinin giderek bulut tabanlı hizmetlere taşındığı dönem (Landaluce et al., 2020).

Üçüncü Nesil: bugün yaygın kabul gören Şekil 1'deki gibi üç katmanlı mimarinin yerleştiği dönem (Firouzi et al., 2020; Landaluce et al., 2020).

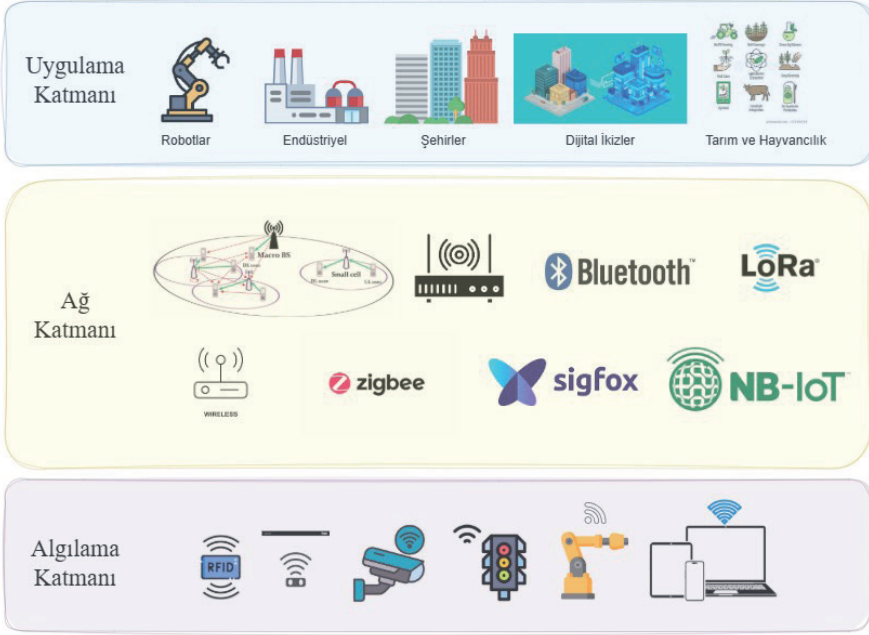


Şekil 1. IoT-Uç mimarisi (IEEE, 2023)

Şekil2’de verilen üç katmanlı mimari, modern IoT sistemlerinin tasarımında yaygın bir referans çerçevesi sunmakta ve aşağıdaki temel katmanlardan oluşmaktadır (Oliveira et al., 2024).

- **Algılama Katmanı:** Fiziksel ortamdan veri toplayan, sensörler, aktüatörler ve tanımlayıcılar gibi temel donanım bileşenlerini içerir. Bu katman, çevresel parametreleri algılayarak ham veriyi dijitalleştirir.
- **Ağ (Network) Katmanı:** Algılama katmanından toplanan verilerin güvenli ve verimli bir şekilde aktarılmasından sorumludur. Çeşitli kablolu/kablosuz teknolojiler ve iletişim protokollerini (TCP/IP, MQTT, CoAP) kapsar ve bilgiyi işleme için bir sonraki katmana yönlendirir.
- **Uygulama (Application) Katmanı:** IoT sisteminin nihai kullanıcıya yönelik hizmetleri sunduğu, veri analizi, işleme, depolama ve karar

verme süreçlerinin uygulandığı katmandır. Bu katman, Akıllı Şehirler, Endüstriyel IoT ve Akıllı Sağlık gibi belirli alanlara özgü uygulamaları barındırır.



Şekil 2. IoT genel mimarisi

Bununla birlikte üç katmanlı mimari, IoT'yi açıklamak için güçlü bir kavramsal çerçeve sunsa da özellikle gecikmeler, artan veri hacmi, bant genişliği sınırlılıkları ve güvenlik/gizlilik gereksinimleri gibi operasyonel zorluklar nedeni ile bilgi işlemin nerede yapılacağı önemli hale gelmiştir. Bu bağlamda bulut bilişim (cloud computing) ve uç bilişim (edge computing), IoT mimarisi içinde birbirini tamamlayan iki kritik yaklaşım olarak öne çıkar. Bulut bilişim, veri depolama, işleme ve analiz hizmetlerini internet üzerinden ölçeklenebilir biçimde sunarak büyük miktardaki verinin merkezi sunucularda yönetilmesini mümkün kılar. Ancak özellikle gerçek zamanlı yanıt gerektiren senaryolarda gecikme ve ağ kaynaklarına bağımlılık gibi sınırlılıklar gösterebilir (Jing Zhang & Tao, 2021). Bu noktada, uç bilişim devreye girer; verilerin üretildiği yerde, yani nesnelerin kenarında işlenmesini sağlayarak yanıt sürelerini azaltır ve ağ trafiğini minimize eder (Mali & Raghuwanshi, 2024). Uç bilişim ise verinin üretildiği noktaya yakın yerde işlenmesini sağlayarak yanıt süresini düşürür, ağ trafiğini azaltır ve yerinde analiz sayesinde hızlı karar üretimini destekler (Sarkar & Misra, 2016).

Bulut-uç ilişkisi çoğunlukla tamamlayıcı bir iş bölümü çerçevesinde ele alınır. Bulut katmanı yüksek hesaplama gücü ve kapsamlı depolama kapasitesi sağlarken, uç katmanı gecikmeye duyarlı çıkarım ve hızlı kontrol kararlarını yerel düzeyde mümkün kılar. Uç tarafında yapılan ön işleme ve filtreleme ile yalnızca kritik/özet bilgilerin buluta iletilmesi, bant genişliğinin daha verimli kullanılmasına katkı sağlayabilir (Soumak, 2024). Bu bütünleşik yaklaşım; performans (düşük gecikme), verimlilik (azalan ağ yükü) ve belirli senaryolarda gizlilik avantajları gibi kazanımlar sunarken, IoT sistemlerinin daha güvenli ve etkili biçimde tasarlanmasını da destekler (Gebremichael et al., 2020). Dolayısıyla bulut ve uç bilişim, IoT uygulamalarında verinin akıllıca işlenmesi ve gerçek zamanlı kararların uygulanabilirliği açısından mimari tasarımın temel belirleyicileri arasında yer almaktadır (Toral et al., 2023).

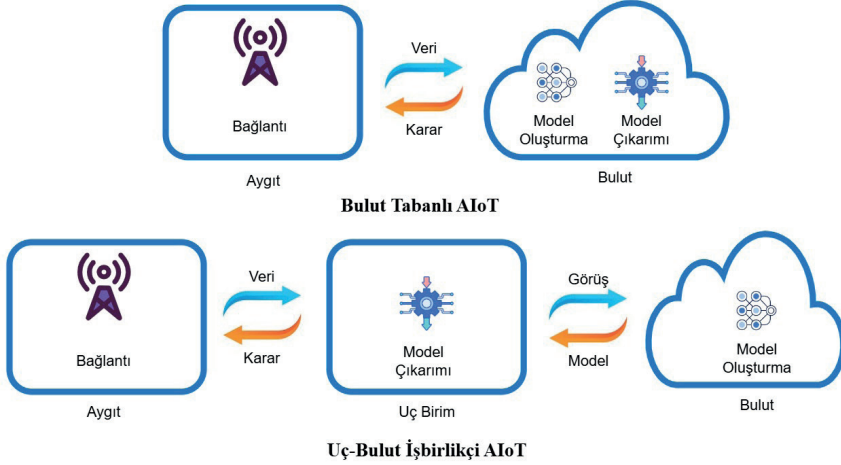
3. AIoT Mimarisi

IoT uygulamalarının evriminde, uygun maliyetli ancak işlem gücü yüksek uç donanımların (mikrodenetleyici tabanlı cihazlar ve tek kartlı bilgisayarlar) yaygınlaşması kritik bir dönüm noktasıdır. Bu donanımlar, belirli yapay zekâ (YZ) algoritmalarını çalıştırabilecek kapasiteye ulaşarak, AIoT'nin merkezinde yer alan uçta (edge) hesaplama yaklaşımını uygulanabilir hâle getirmiştir. Böylece AIoT mimarileri, yalnızca veriyi toplamak ve iletmekle sınırlı kalmayıp; veriyi uçta ön işleyen, çıkarım (inference) üreten ve gerektiğinde bulut ile iş birliği yapan katmanlı yapılara dönüşmüştür. AIoT mimarisi, işlevsel olarak üç tamamlayıcı katman üzerinden ele alınabilir:

- **Akıllı Algılama Katmanı (Edge-Endpoint AI):** Bu katmanda YZ, algılanan veriler üzerinde yerel düzeyde ön işleme, gürültü azaltma, özellik çıkarımı ve belirli senaryolarda temel sınıflandırma gibi işlemleri yürütür. Kaynak kısıtlı cihazlarda makine öğrenmesi işlevlerini mümkün kılan TinyML yaklaşımı, bu katmanda önemli bir ivme kazandırmıştır. TinyML, sıkıştırılmış ve optimize edilmiş modeller aracılığıyla düşük güç tüketimiyle hızlı çıkarım yapılmasını destekleyerek cihazların anlık karar üretebilmesini sağlar.
- **Akıllı Ağ ve Uç Katmanı (Edge AI):** Ağ katmanına yakın konumlandırılan uç düğümler, algılama katmanından gelen veriler üzerinde daha karmaşık çıkarım modellerini çalıştırır ve gecikmeye duyarlı uygulamalarda gerçek zamanlı karar üretiminin ana yükünü üstlenir. Bu düzeyde YZ; ağ trafiği optimizasyonu, kaynak yönetimi, hizmet sürekliliği ve güvenlik ihlallerinin tespiti gibi fonksiyonlarda da etkin rol oynar.

- Akıllı Uygulama ve Bulut Katmanı (Cloud AI): Bu katman, sistemin küresel optimizasyonu ve model yaşam döngüsü yönetimi açısından kritik öneme sahiptir. Uçtan iletilen özetlenmiş veya kritik veriler, bulutta daha büyük ölçekli modellerin eğitimi ve güncellenmesinde kullanılır. Bulut, kapsamlı öngörüsöl analizler ve uzun vadeli iş zekâsı üretirken; güncellenen modellerin yeniden uç düğümlere dağıtılması, AIoT sisteminin performansının sürekli iyileştirilmesini mümkün kılar.

AIoT altyapıları, yapay zekâ modelinin oluşturulması ve yönetimi, IoT cihaz bağlantısı, ağ iletişimi ve veri işleme/hesaplama stratejileri gibi tasarım zorlukları bağlamında bulut tabanlı AIoT ve uç-bulut iş birliğine dayalı AIoT olmak üzere iki temel kullanım altında sınıflandırılmaktadır: (Rong & Cheng, 2021). Bu iki yaklaşım Şekil 3'de özetlenmektedir.



Şekil 3. AIoT'nin iki farklı kullanımı (Rong & Cheng, 2021).

3.1. Bulut Tabanlı AIoT

Bulut tabanlı YZ ve IoT, günümüzde birçok sektörde önemli dönüşümlere neden olan iki başlıca teknolojidir. Bulut bilişim, büyük miktardaki verileri depolama, analiz etme ve işleme yeteneği sunarken, bu verilerin merkezileştirilmiş sunucular aracılığıyla erişilmesini ve analiz edilmesini sağlar. AIoT ise bulut teknolojisini kullanarak, uç cihazlara hem yerel hem de merkezi olarak depolanan bilgilere dayanarak bağımsız kararlar alabilme yeteneğini kazanır. Ayrıca bu cihazlar, ağ üzerindeki diğer bağlı sistemlerde belirli iş akışlarını tetikleme ve başlatma yetkisine sahiptir. Toplanan veriler,

güçlü ve esnek bilgi işlem ile depolama kapasitelerine sahip bulut sunucularına iletilir ve bu sunucular, makine öğrenimi modellerinin hem eğitimi hem de doğrulanması için temel platformu sağlar (Rong & Cheng, 2021).

Ancak, bu bulut temelli mimari, günümüzün ağ ve IoT cihazları tarafından üretilen hızla artan veri hacmi (Yu et al., 2017) ile birlikte, cihazlar ile uzak bulut platformu arasındaki ağ kısıtlılıkları ve iletişim gecikmeleri (Preamsankar et al., 2018) gibi ciddi zorluklarla karşı karşıyadır. Bu engellere rağmen, bulut tabanlı AIoT çözümlerinin sağladığı ölçeklenebilirlik, operasyonel esneklik ve kolay entegrasyon kabiliyetleri, akıllı uygulamaların gelecekteki gelişiminin temelini oluşturmaktadır. İşletmeler için bu mimari, üretim verimliliğini artırmanın yanı sıra, erişim kontrol sistemlerini tehdit seviyelerine göre hızla genişletme veya yeniden yapılandırma esnekliği sunarak çevik ve hızlı yanıt verme ihtiyacını karşılamaktadır (Matin et al., 2023).

3.2. Uç-Bulut İş Birliğine Dayalı AIoT

Uç ve bulut iş birliğine dayalı AIoT bilişim modeli, yapay zekâ çıkarım süreçlerini doğrudan IoT cihazlarının içine entegre edilmiş uç bilişim katmanına taşıyarak önemli bir dönüşüm sağlar. Bu yaklaşım sayesinde, tüm ham verinin analiz ve işleme için uzak buluta gönderilmesi yerine, büyük bir kısmı yerel olarak çözümlenebilir. Bulut tabanlı AIoT sistemlerinin karşılaştığı zorluklar, bu işbirlikçi uç-bulut mimarisi aracılığıyla hafifletilebilir. Sonuç olarak, uç bilişim altyapısı gelişmiş yapay zekâ modellerini kullanarak hız, yüksek güvenilirlik, düşük gecikme süresi ve artırılmış kapasite gibi avantajlar sunar. Ancak, bu modellerin eğitimi için gereken yoğun hesaplama gücü nedeniyle, geleneksel bulut bilişim hâlâ vazgeçilmez bir rol üstlenmektedir. Sensör donanımlı geleneksel ekipmanlardan kaynaklanan devasa veri kütleleri bulut veri tabanlarında depolanır; ne var ki, depolanan bu büyük hacimli veriyi organize edip anlamlı bilgiye dönüştürmek önemli bir güçlük teşkil eder. Endüstrinin ekonomik açıdan sürdürülebilir bir üretim için yapay zekâ yeteneklerine sahip olmasını sağlamak amacıyla, AIoT özellikli altyapının bu büyük veri tabanlarıyla kesintisiz bir şekilde bağlantı kurması zorunludur. Gerçek zamanlı üretim ortamlarında AIoT sistemlerini etkin bir şekilde kullanabilmek için, cihaz-sensör-depolama ve bunun tersi arasındaki sürekli iletişimi ve veri tabanlarına erişimi destekleyecek sağlam bir ağ altyapısına ihtiyaç vardır (Matin et al., 2023).

4. AIoT Uygulama Alanları ve Kullanım Senaryoları

Endüstriler ile akıllı evler, ulaşım, eğitim ve sağlık gibi alanlar için geliştirilmiş çok sayıda IoT uygulaması son yıllarda yaygınlaşmıştır. Bu

çerçevede akıllı fabrika yaklaşımı; makinelerin ya da endüstriyel ekipmanların, çalışma durumlarını algılayıp sürekli izleyebilen sensörler ve akıllı cihazlarla donatılmasıyla tanımlanır. Söz konusu makineler altyapıya veya merkezi bir kontrol platformuna entegre edilerek, bilgiye ve kontrol işlevlerine gerçek zamanlı erişim mümkün hâle gelir. Endüstriyel bağlamdaki AIoT çözümleri; üretkenliği artırma, operasyonları anlık olarak yönetebilme, verimlilik sağlama ve ürün kalitesini iyileştirme gibi çıktılar sunar.

Endüstride AIoT'nin kullanım alanları oldukça genişir: tahmine dayalı bakım, izleme-yönetim süreçleri, uzaktan izleme, kalite denetimi, enerji yönetimi ile iş sağlığı ve güvenliği uygulamaları bu başlıklar arasında sayılabilir. Bu çözümler, makinelerin durumunu anlık izleyen ve yönetim/denetim kararlarını destekleyen kontrol sistemleri oluşturur. Farklı sensörlerden elde edilen veriler toplanır ve analiz edilerek daha ileri düzey kestirim ve analitik süreçlerinde değerlendirilir. Makine arızaları veya karmaşık operasyonel problemler ise envanter takibi, ekipman ve cihazların birbirine bağlanması gibi izleme tabanlı uygulamalarla daha sistematik biçimde ele alınabilir. Enerji yönetimi de AIoT'nin öne çıkan kullanım alanlarından biridir; enerji tüketiminin izlendiği endüstrilerde, veri modellerinin analiz edilmesiyle kullanımın optimize edilmesi, dağıtımın iyileştirilmesi ve akıllı yönetim senaryolarının geliştirilmesi hedeflenir. Benzer şekilde, üretimde kalite yönetimi; farklı aşamalardan elde edilen verilerin düzenli biçimde toplanması ve işlenmesi sayesinde daha izlenebilir ve yönetilebilir hâle gelir. Tedarik zinciri optimizasyonunda ise sevkiyatların izlenmesi ile sıcaklık ve nem gibi çevresel koşulların takibi için AIoT tabanlı uygulamalardan yararlanılmaktadır (Naseer Qureshi & Newe, n.d.).

Akıllı evlere yönelik AIoT uygulamaları; aydınlatmanın yönetimi, güvenlik kameraları, ev aletlerinin kontrolü, enerji yönetimi ve güvenlik denetimi gibi alanlarda gerçek zamanlı otomasyon ve kontrol imkânları sunar. Bu kapsamda kullanıcılar, akıllı telefon ve benzeri mobil cihazlar üzerinden evdeki sistemlere uzaktan erişerek cihazları izleyebilir ve yönetebilir. Akıllı ev ekosisteminde öne çıkan IoT/AIoT kullanım alanları arasında özellikle enerji kontrolü ve yönetimi, akıllı ölçüm ile güvenlik kontrol sistemleri yer almaktadır.

IoT tabanlı güvenlik çözümleri; erişimi ve olası riskleri yönetebilmek amacıyla hareket sensörleri, kameralar, kapı-pencere sensörleri ve akıllı kilit bileşenlerini bütünleşik bir yapıda bir araya getirir. Enerji yönetimine odaklanan uygulamalar ise merkezi ısıtma veya klima sistemlerinde sıcaklık parametrelerinin izlenmesi ve ayarlanması yoluyla enerji tüketiminin kontrol edilmesine ve daha verimli kullanım senaryolarının oluşturulmasına

katkı sağlar. Benzer biçimde akıllı aydınlatma sistemleri; zamanlama, kullanıcı tercihleri veya hareket algılama verileri gibi girdileri kullanarak ışıklandırmayı otomatikleştirebilir ve yönetebilir. Bu tür stratejiler, enerji maliyetlerini düşürmeye yardımcı olurken aynı zamanda istenen atmosferin oluşturulmasını destekler ve kullanıcı konforunu artırır.

Akıllı evlerde AIOt'ye örnek gösterilebilecek bir diğer yaklaşım da sesli asistanların kullanımıdır. Amazon Alexa veya Apple Siri gibi sistemler, ev termostatu ve sıcaklık gibi değişkenlerin sesli komutlarla kontrol edilmesine olanak tanıyarak ev içi etkileşimi daha pratik hâle getirir (Naseer Qureshi & Newe, n.d.).

IoT ağlarında yapay zekâdan yararlanılması; sunduğu çok yönlü faydalar, mevcut hizmetleri zenginleştirilmesi ve operasyonel verimliliği artırması nedeniyle giderek yaygınlaşmaktadır. Yapay zekâ, IoT ekosisteminin güvenilirliğini, akıllı karar üretme kapasitesini ve verimliliğini yükselterek verinin yerel (uç) düzeyde işlenmesini, analiz edilmesini ve belirli durumlarda otomatik kararların alınmasını mümkün kılar. AIOt uygulamalarının öne çıkan kullanım biçimleri aşağıda özetlenmiştir:

- **Veri Analitiği:** AIOt cihazları çok büyük hacimde veri üretir ve bu verinin anlamlı çıktılara dönüşmesi için analiz edilmesi gerekir. Yapay zekâ ve makine öğrenmesi, sensör verileri üzerinde örüntü, anomali ve eğilimleri belirleyerek sistemin “ne oluyor?” sorusuna yanıt vermesini sağlar; ayrıca farklı sensörlerden gelen verileri birleştirerek bağlamı zenginleştirebilir. Bu sayede olası arızalar erken fark edilir, süreç performansı izlenir ve karar vericilere operasyonu iyileştirmeye dönük somut içgörüler sunulur.
- **Karar Verme:** AI yöntemleri, uç ve bulut bilişim altyapılarıyla bütünleşmiş IoT cihazlarından gelen verileri kullanarak gerçek zamanlı karar desteği veya otomatik aksiyon üretir. Kritik ve düşük gecikme gerektiren durumlarda uç tarafta hızlı değerlendirme yapılırken, daha karmaşık senaryolarda bulut tarafında bağlamsal analiz ve politika güncellemeleri yürütülebilir. Böylece kontrol süreçleri daha çevik hâle gelir, karar kalitesi artar ve insan müdahalesi gerektiren durumlar daha doğru şekilde ayrıştırılabilir.
- **Tahmin Süreçleri:** AIOt, ekipmanların çalışma durumunu ve arıza olasılığını erken öngörmek için sensör verilerinden yararlanır. Makine öğrenmesi modelleri zaman serisi verilerindeki değişimleri izleyerek bozulma işaretlerini tanımlar, arıza gerçekleşmeden önce risk düzeyini ortaya koyar ve bakımın planlı şekilde yapılmasına imkân verir. Bu

yaklaşım plansız duruş sürelerini azaltır, üretim sürekliliğini güçlendirir ve bakım kaynaklarının daha verimli kullanılmasına katkı sağlar.

- **Enerji Yönetimi:** AİoT tabanlı enerji yönetimi, tüketim verilerini ve kullanım alışkanlıklarını analiz ederek enerji kullanımını dinamik biçimde ayarlamayı hedefler. Sistem; talep artışı, tarife değişimi veya çevresel koşullar gibi girdileri dikkate alarak yük dengeleme, pik saatlerde tüketimi azaltma ve kullanım senaryolarını optimize etme gibi stratejiler üretebilir. Böylece enerji tasarrufu sağlanır, maliyetler düşer ve enerji yönetimi daha ölçülebilir ve sürdürülebilir bir yapıya kavuşur.
- **Güvenlik Uygulamaları:** Yapay zekâ, İoT ağlarında hem ağ trafiğini hem de cihaz davranışlarını izleyerek olağandışı etkinlikleri gerçek zamanlı tespit etmeye yardımcı olur. Anomali algılama ve davranış profillemeye yaklaşımlarıyla yetkisiz erişim, şüpheli veri akışı veya beklenmedik cihaz eylemleri erken belirlenebilir; gerekli durumlarda uyarı üretme, erişimi sınırlandırma veya cihazı izole etme gibi önleyici adımlar devreye alınabilir. Bu sayede güvenlik olaylarının etkisi azaltılır ve sistem dayanıklılığı artırılır.
- **Dil İşleme:** Doğal dil işleme (NLP) uygulamaları, AİoT cihazlarının kullanıcılarla sesli komutlar veya yazılı metin üzerinden daha sezgisel etkileşim kurmasını sağlar. Komutları yalnızca tanımakla kalmayıp niyet çıkarımı yaparak doğru eylemlere dönüştürür, gerektiğinde açıklayıcı geri bildirim vererek kullanım kolaylığını artırır. Böylece kullanıcı deneyimi iyileşir, erişilebilirlik genişler ve cihazların yönetimi daha pratik hâle gelir.
- **Akıllı Ev Yönetimi:** Aİ tabanlı akıllı ev uygulamaları, kullanıcının tercihlerini ve rutinlerini öğrenerek ısıtma-soğutma, aydınlatma ve cihaz kontrolünü kişiselleştirilmiş otomasyonla yönetir. Sensör verileri (hareket, ortam koşulları, enerji tüketimi gibi) davranışsal bilgilerle birleştirildiğinde, evin farklı zamanlarda farklı ihtiyaçlara göre uyarlanması mümkün olur. Bu yaklaşım hem konforu artırır hem de kaynakların daha verimli kullanılmasına katkı sağlar.
- **Trafik ve Park Yönetimi:** Yapay zekâ destekli AİoT çözümleri, GPS, kamera ve yol sensörleri gibi çoklu veri kaynaklarını kullanarak trafik akışını optimize etmeyi amaçlar. Yoğunluk tahmini, olası sıkışıklık noktalarının önceden belirlenmesi ve yönlendirme önerileriyle sürüş süreleri azaltılabilir; park tarafında doluluk tahmini ve uygun park

alanına yönlendirme gibi uygulamalar geliştirilebilir. Böylece kentsel hareketlilik daha verimli yönetilir ve trafik kaynaklı kayıplar azaltılır.

- **Akıllı Sağlık Hizmetleri:** AIoT, hastaların vücut ısısı, kalp atış hızı ve hareket gibi yaşamsal göstergelerini sürekli izleyerek erken uyarı ve uzaktan takip imkânı sunar. Toplanan veriler analiz edilerek riskli sapmalar belirlenebilir ve acil durumlarda sağlık profesyonellerine zamanında bildirim gönderilebilir. Bu yaklaşım, özellikle kronik hastalık takibi ve evde bakım senaryolarında erken müdahaleyi destekleyerek sağlık hizmetlerinin sürekliliğini güçlendirir.
- **Çevresel İzleme:** IoT sensörleri yapay zekâ ile entegre edildiğinde su kalitesi, hava koşulları ve hava kalitesi gibi çevresel değişkenler daha sürekli ve anlamlı biçimde izlenebilir. AI modelleri, yalnızca mevcut durumu raporlamakla kalmayıp çevresel değişimlerin eğilimlerini ortaya çıkarabilir, risk göstergelerini erken saptayabilir ve olası afet/kirlilik senaryolarına yönelik karar desteği üretebilir. Bu sayede çevresel yönetim, erken uyarı ve kaynak planlaması daha etkin hâle gelir.
- **Dijital İkiz (Digital Twin):** AIoT'nin öne çıkan kullanım biçimlerinden biri, fiziksel varlıkların (makine, üretim hattı, bina veya altyapı bileşenleri) sensör verileriyle sürekli güncellenen sanal bir temsilinin oluşturulmasıdır. Dijital ikiz yaklaşımı, sistemin mevcut durumunu izlemekle sınırlı kalmayıp farklı senaryoların simüle edilmesine olanak tanır; böylece ayar değişikliklerinin olası sonuçları önceden değerlendirilebilir, süreç iyileştirmeleri daha güvenli biçimde test edilebilir ve bakım/kapasite planlama kararları daha rasyonel bir zemine taşınabilir. Bu kullanım biçimi, arıza riskini azaltma, verimlilik artırma ve operasyonel kararların doğruluğunu yükseltme açısından AIoT ekosistemine stratejik bir katkı sunar.
- **Görsel Denetim ve Uçta Görüntü İşleme:** Kamera tabanlı AIoT çözümleri, sensör verilerinin tek başına yakalayamayacağı görsel ipuçlarını kullanarak kalite kontrol, güvenlik ve süreç izleme görevlerini güçlendirir. Uçta çalışan görüntü işleme modelleri; yüzey kusuru, montaj hatası, yanlış ürün sınıflaması veya güvenlik ihlali gibi durumları gerçek zamanlı tespit ederek üretim hattında hızlı müdahaleyi mümkün kılar. Ayrıca görsel verinin yerinde işlenmesi, gecikmeyi azaltırken veri taşınmasını sınırlayarak bant genişliği ve mahremiyet açısından da avantaj sağlayabilir.
- **Otonom Robotlar ve AMR Filoları:** Depo, lojistik ve üretim ortamlarında otonom mobil robotlar (AMR) ve robot filoları,

AIoT altyapısı ile entegre edildiğinde görev atama, rota planlama, çarpışma önleme ve dinamik iş akışı düzenleme gibi işlevleri daha etkin biçimde yürütebilir. Sensörler ve konum verileri üzerinden anlık durum farkındalığı oluşturulması, filonun darboğazlara göre yeniden yönlendirilmesini ve kaynakların daha dengeli kullanılmasını sağlar. Böylece hem operasyon sürekliliği güçlenir hem de insan gücüyle yürütülen tekrar eden süreçlerde verimlilik artışı elde edilebilir.

- **İş Sağlığı ve Güvenliği için Önleyici Analitik:** AIoT, iş sağlığı ve güvenliği alanında giyilebilir sensörler, ortam sensörleri ve gerektiğinde kamera verilerini birleştirerek riskleri oluşmadan önce belirlemeye yardımcı olabilir. Tehlikeli bölgeye yaklaşma, uygunsuz duruş/ergonomi, aşırı yorgunluk göstergeleri veya ortamda gaz/ısı gibi risk faktörleri gerçek zamanlı izlenerek erken uyarı mekanizmaları devreye alınabilir. Bu yaklaşım, güvenlik kültürünü desteklerken iş kazalarının azaltılmasına ve sahada proaktif risk yönetimi yapılmasına katkı sağlar.
- **Karbon Muhasebesi ve Sürdürülebilirlik Optimizasyonu:** AIoT uygulamaları enerji tüketimini izlemekle sınırlı kalmayıp süreç bazlı emisyon hesaplamaları ve sürdürülebilirlik performansının yönetimi için de kullanılabilir. Üretim, bina yönetimi veya lojistik süreçlerinden gelen tüketim verileri emisyon faktörleriyle eşleştirilerek karbon ayak izi daha doğru izlenebilir; ayrıca optimizasyon algoritmalarıyla kaynak kullanımı iyileştirilerek azaltım senaryoları geliştirilebilir. Böylece sürdürülebilirlik hedefleri ölçülebilir göstergeler üzerinden izlenir ve kurumsal raporlama süreçleri daha tutarlı hâle gelir.
- **Tarım ve Su Yönetimi için AIoT (Hassas Tarım):** Tarımda AIoT uygulamaları; toprak nemi, hava durumu, bitki gelişim verileri ve görüntü tabanlı göstergeleri bir araya getirerek sulama zamanlaması ve miktarının daha isabetli belirlenmesini sağlar. Yapay zekâ, bitki stresini erken saptayarak su kullanımını optimize edebilir, verim kaybını azaltmaya dönük karar desteği üretebilir ve kaynak yönetimini güçlendirebilir. Bu kullanım biçimi, özellikle su kıtlığı ve iklim değişkenliği koşullarında sürdürülebilir tarım uygulamalarının veri temelli şekilde planlanmasına katkı sunar.

5. Sonuç

Bu bölümde IoT genel hatlarıyla açıklanmış ve temel mimarisi ortaya konulmuştur. IoT den yola çıkarak çok yaygın kullanılan YZ teknolojisi ile AIoT mimarisinin nasıl birleştiği hem genel hatları ile hem de mimari

kullanımları ile açıklanmıştır. AIoT alanında yapılan son çalışmalar ve temel uygulamalı kısaca verilerek bu alanda çalışma yapacaklara bir yol haritası oluşturulmaya çalışılmıştır. Özellikle bulut bilişimin büyük ölçekli depolama ve analiz kapasitesiyle merkezi bir rol üstlenirken, uç bilişim gecikmeye duyarlı senaryolarda yerinde işlemeyi mümkün kılarak yanıt süresini azaltmakta ve ağ yükünü düşürdüğü vurgulanmıştır. Günümüzde akıllı şehirler, akıllı tarım, akıllı ulaşım, akıllı fabrikalar ve sağlık gibi temel alanlarda yaygın kullanılan AIoT teknolojileri iş sağlığı, sürdürülebilirlik ve uçta görüntü işleme gibi yeni uygulama alanlarında önemli bir teknoloji olacağı düşünülmektedir. Ayrıca dijital ikiz konusunda AIoT teknolojisinin kilit rol oynayacağı öngörülmektedir.

Kaynakça

- Adli, H. K., Remli, M. A., Wong, K. N. S. W. S., Ismail, N. A., González-Bri-
ones, A., Corchado, J. M., & Mohamad, M. S. (2023). Recent Advan-
cements and Challenges of AIoT Application in Smart Agriculture: A
Review. In *Sensors*. <https://doi.org/10.3390/s23073752>
- Ande, R., Adebisi, B., Hammoudeh, M., & Saleem, J. (2020). Internet of Thin-
gs: Evolution and Technologies From a Security Perspective. In *Sustai-
nable Cities and Society*. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101728>
- Awaisi, K. S., Hussain, S., Ahmed, M., Khan, A. A., & Ahmed, G. (2020). Le-
veraging IoT and fog computing in healthcare systems. *IEEE Internet of
Things Magazine*, 3(2), 52–56.
- Awaisi, K. S., Ye, Q., & Sampalli, S. (2024). A Survey of Industrial AIoT:
Opportunities, Challenges, and Directions. *IEEE Access*, 12(July 2024),
96946–96996. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3426279>
- Barkani, M. El, Benamar, N., Talei, H., & Bagaa, M. (2024). Gas Leaka-
ge Detection Using Tiny Machine Learning. In *Electronics*. <https://doi.org/10.3390/electronics13234768>
- Berte, D.-R. (2018). Defining the IoT. In *Proceedings of the International Con-
ference on Business Excellence*. <https://doi.org/10.2478/picbe-2018-0013>
- Chakroun, M., Sayah, J., Kallab, C., & Haddad, S. (2022). Internet of Things:
Towards a Solid Ecosystem of Interconnected Things. In *Advances in In-
ternet of Things*. <https://doi.org/10.4236/ait.2022.123004>
- DeMedeiros, K., Hendawi, A., & Álvarez, M. (2023). A Survey of AI-Based
Anomaly Detection in IoT and Sensor Networks. In *Sensors*. <https://doi.org/10.3390/s23031352>
- Derawi, M., Dalveren, Y., & Cheikh, F. A. (2020). Internet-of-Things-Based
Smart Transportation Systems for Safer Roads. *2020 IEEE 6th World
Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/WF-IoT48130.2020.9221208>
- Dwivedi, S. K., Roy, P., Karda, C., Agrawal, S., & Amin, R. (2021). Block-
chain-Based Internet of Things and Industrial IoT: A Comprehen-
sive Survey. In *Security and Communication Networks*. <https://doi.org/10.1155/2021/7142048>
- Elijah, O., Rahman, T. A., Orikumhi, I., Leow, C. Y., & Hindia, M. H. D.
N. (2018). An overview of Internet of Things (IoT) and data analytics
in agriculture: Benefits and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*,
5(5), 3758–3773.
- Firouzi, F., Nassif, S., & Chakrabarty, K. (2020). *Intelligent internet of things*.
- Fu, S., Dong, F., Shen, D., Chen, R., & Hao, J. (2024). DESIGN: Online De-
vice Selection and Edge Association for Federated Synergy Learning-E-

- nabled AIoT. In *Acm Transactions on Intelligent Systems and Technology*. <https://doi.org/10.1145/3673237>
- Gebremichael, T., Ledwaba, L. P. I., Eldefrawy, M. H., Hancke, G. P., Pereira, N., Gidlund, M., & Åkerberg, J. (2020). Security and Privacy in the Industrial Internet of Things: Current Standards and Future Challenges. In *Ieee Access*. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3016937>
- Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions. In *Future Generation Computer Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>
- IEEE. (2023). *Real-Life Use Cases for Edge Computing*. IEEE Innovation at Work. <https://innovationatwork.ieee.org/real-life-edge-computing-use-cases/>
- Jamwal, A., Agrawal, R., Sharma, M., & Giallanza, A. (2021). Industry 4.0 technologies for manufacturing sustainability: A systematic review and future research directions. *Applied Sciences*, 11(12), 5725.
- Joyia, G. J., Liaqat, R. M., Farooq, A., & Rehman, S. (2017). Internet of medical things (IoMT): Applications, benefits and future challenges in health-care domain. *J. Commun.*, 12(4), 240–247.
- Kabalci, Y., Kabalci, E., Padmanaban, S., Holm-Nielsen, J. B., & Blaabjerg, F. (2019). Internet of Things Applications as Energy Internet in Smart Grids and Smart Environments. In *Electronics*. <https://doi.org/10.3390/electronics8090972>
- Kamarudin, I. E., Ameen, M. A., Razak, M. F. A., & Zabidi, A. (2023). Integrating Edge Computing and Software Defined Networking in Internet of Things: A Systematic Review. In *Iraqi Journal for Computer Science and Mathematics*. <https://doi.org/10.52866/ijcsm.2023.04.04.011>
- Katie, B. (2024). Internet of Things (IoT) for Environmental Monitoring. In *International Journal of Computing and Engineering*. <https://doi.org/10.47941/ijce.2139>
- Khalid, S. J. (2021). Internet of Robotic Things: A Review. In *Journal of Applied Science and Technology Trends*. <https://doi.org/10.38094/jastt203104>
- Knez, T., Machidon, O., & Pejović, V. (2021). Self-Adaptive Approximate Mobile Deep Learning. In *Electronics*. <https://doi.org/10.3390/electronics10232958>
- Landaluce, H., Arjona, L., Perallos, A., Falcone, F., Angulo, I., & Muralter, F. (2020). A Review of IoT Sensing Applications and Challenges Using RFID and Wireless Sensor Networks. *Sensors*, 20(9). <https://doi.org/10.3390/s20092495>
- Li, J. (2024). Visual Perception and Deep Learning in Smart Homes and the Internet of Things. In *Highlights in Science Engineering and Technology*. <https://doi.org/10.54097/bcvmxs60>

- Lodhi, E., Liu, X., Xiong, G., Khan, M. A., Lodhi, Z., Nawaz, T., Dilawar, A., Tarkoma, S., & Wang, F. (2025). SmartPV-AIoT: an AIoT-integrated framework for fault diagnosis and remote monitoring in photovoltaic systems. *Energy Conversion and Management: X*, 27(June), 101117. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.101117>
- Madakam, S., Ramaswamy, R., & Tripathi, S. (2015). Internet of Things (IoT): A Literature Review. In *Journal of Computer and Communications*. <https://doi.org/10.4236/jcc.2015.35021>
- Mali, P., & Raghuwanshi, P. P. (2024). A Review on Intrusion Detection in IoT Networks: Existing Challenges. In *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management*. <https://doi.org/10.55041/ijssrem28454>
- Matin, A., Islam, M. R., Wang, X., Huo, H., & Xu, G. (2023). AIoT for sustainable manufacturing: Overview, challenges, and opportunities. *Internet of Things (Netherlands)*, 24(August), 100901. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100901>
- Miller, T., Mikiciuk, G., Durluk, I., Mikiciuk, M., Łobodzińska, A., & Śnieg, M. (2025). The IoT and AI in Agriculture: The Time Is Now—A Systematic Review of Smart Sensing Technologies. In *Sensors*. <https://doi.org/10.3390/s25123583>
- Misra, D., Das, G., Chakraborty, T., & Das, D. (2018). An IoT-based waste management system monitored by cloud. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 20(3), 1574–1582.
- Naseer Qureshi, K., & Newe, T. (n.d.). *Artificial Intelligence of Things (AIoT): New Standards, Technologies and Communication Systems*.
- Oliveira, F., Costa, D. G., Assis, F., & Silva, I. (2024). Internet of Intelligent Things: A convergence of embedded systems, edge computing and machine learning. *Internet of Things (Netherlands)*, 26(November 2023), 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101153>
- PremSankar, G., Di Francesco, M., & Taleb, T. (2018). Edge Computing for the Internet of Things: A Case Study. *IEEE Internet of Things Journal*, 5(2), 1275–1284. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2018.2805263>
- Rahman, M. A., Hossain, M. S., Showail, A. J., Alrajeh, N. A., & Ghoneim, A. (2023). AI-Enabled IIoT for Live Smart City Event Monitoring. *IEEE Internet of Things Journal*, 10(4), 2872–2880. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2021.3109435>
- Rajab, R. M., Abuhmida, M., Wilson, I., & Ward, R. (2024). A Review of IoMT Security and Privacy Related Frameworks. In *European Conference on Cyber Warfare and Security*. <https://doi.org/10.34190/eccws.23.1.2239>
- Rong, H., & Cheng, T. (2021). Research and Control of Underground Pressure Law of Coal Mining Face in Soft Rock Strata Based on Neural Network

- under the Background of Wireless Network Communication. *Mobile Information Systems*, 2021(1), 6560713. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2021/6560713>
- Sahu, S. K., & Mazumdar, K. (2024). Exploring Security Threats and Solutions Techniques for Internet of Things (IoT): From Vulnerabilities to Vigilance. In *Frontiers in Artificial Intelligence*. <https://doi.org/10.3389/frai.2024.1397480>
- Sarkar, S., & Misra, S. (2016). Theoretical Modelling of Fog Computing: A Green Computing Paradigm to Support IoT Applications. In *Iet Networks*. <https://doi.org/10.1049/iet-net.2015.0034>
- Shen, L., Wang, F., Zhang, M., Liu, J., Liu, G., & Fan, X. (2023). AIoT-Empowered Smart Grid Energy Management with Distributed Control and Non-Intrusive Load Monitoring. *2023 IEEE/ACM 31st International Symposium on Quality of Service (IWQoS)*, 1–10. <https://doi.org/10.1109/IWQoS57198.2023.10188781>
- Soumak, D. (2024). A Comparative Analysis of Cloud Computing and Fog Computing: Advancing Towards Edge Intelligence. *International Journal For Multidisciplinary Research*, 6(1), 1–7. <https://doi.org/10.36948/ijfmr.2024.v06i01.12569>
- Toral, I. M., Calvo, I., Xenakis, J., Artetxe, E., & Barambones, Ó. (2023). Architecture for Smart Buildings Based on Fuzzy Logic and the OpenFog Standard. In *Electronics*. <https://doi.org/10.3390/electronics12244889>
- Wazid, M., Das, A. K., & Park, Y. (2021). Blockchain-Envisioned Secure Authentication Approach in AIoT: Applications, Challenges, and Future Research. In *Wireless Communications and Mobile Computing*. <https://doi.org/10.1155/2021/3866006>
- Xia, P., & Hu, F. (2025). Artificial Intelligence of Things Induced Predictive Maintenance of Computer Numerical Control Machine. In *Internet Technology Letters*. <https://doi.org/10.1002/itl2.70082>
- Xu, H., Seng, K. P., Ang, L. M., & Smith, J. (2024). Decentralized and Distributed Learning for AIoT: A Comprehensive Review, Emerging Challenges, and Opportunities. *IEEE Access*, 12, 101016–101052. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3422211>
- Xu, H., Seng, K. P., Smith, J. S., & Ang, L.-M. (2024). Multi-Level Split Federated Learning for Large-Scale AIoT System Based on Smart Cities. In *Future Internet*. <https://doi.org/10.3390/fi16030082>
- Yan, J. (2024). AIoT in Smart Homes: Challenges, Strategic Solutions, and Future Directions. In *Highlights in Science Engineering and Technology*. <https://doi.org/10.54097/8hzgaf51>

- Yu, W., Liang, F., He, X., Hatcher, W. G., Lu, C., Lin, J., & Yang, X. (2017). A Survey on the Edge Computing for the Internet of Things. *IEEE Access*, 6, 6900 – 6919. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2778504>
- Zhang, Jing, & Tao, D. (2021). Empowering Things With Intelligence: A Survey of the Progress, Challenges, and Opportunities in Artificial Intelligence of Things. In *Ieee Internet of Things Journal*. <https://doi.org/10.1109/jiot.2020.3039359>
- Zhang, Jun, Wang, Y., Li, S., & Shi, S. (2020). An architecture for IoT-enabled smart transportation security system: A geospatial approach. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(8), 6205–6213.

