



ULUSLARARASI 3B YAZICI TEKNOLOJİLERİ  
VE DİJİTAL ENDÜSTRİ DERGİSİ


INTERNATIONAL JOURNAL OF 3D PRINTING  
TECHNOLOGIES AND DIGITAL INDUSTRY

ISSN:2602-3350 (Online)

URL: <https://dergipark.org.tr/ij3dptdi>

## LPWAN SENSÖRLERİN ÖZELLİKLERİ VE IOT UYGULAMALARINA ETKİLERİ

## THE CHARACTERISTICS OF LPWAN SENSORS AND EFFECTS ON IOT APPLICATIONS

Yazarlar (Authors): Lütfi Apilioğulları \*


***Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article):***  
Apilioğulları L. "Lpwan sensörlerin özellikleri ve iot uygulamalarına etkileri" *Int. J. of 3D Printing Tech. Dig. Ind.*, 4(2): 152-160, (2020).

DOI: 10.46519/ij3dptdi.725120

Araştırma Makale/ Research Article

Erişim Linki: (To link to this article): <https://dergipark.org.tr/en/pub/ij3dptdi/archive>

# LPWAN SENSÖRLERİN ÖZELLİKLERİ VE IOT UYGULAMALARINA ETKİLERİ

Lütfi Apilioğulları \*

\*Fenerbahçe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, TÜRKİYE

\* Sorumlu Yazar: [lutfi.apiliogullari@leanofis.com](mailto:lutfi.apiliogullari@leanofis.com)

## ÖZ

Nesnelerin İnterneti (IoT) alanında yapılan proje uygulamalarındaki artış yeni ihtiyaçların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Uzak mesafe, düşük güç tüketen ve batarya ile çalışan sensörler ile bu sensörleri destekleyen kablosuz iletişim protokolleri giderek daha popüler hale gelmektedir. Bu çalışmada literatürde LPWAN (Low Power Wide Area Network) olarak tanımlanan bu yeni teknolojinin özellikleri, IoT ağlarında kullanılan diğer teknolojilerden farkları ve LoRa (Long Range) sensörlerin güç optimizasyonu teknikleri literatür incelemesi ve örnek uygulama üzerinden irdelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** LPWAN, LoRa, Nesnelerin interneti.

## THE CHARACTERISTICS OF LPWAN SENSORS AND EFFECTS ON IOT APPLICATIONS

### ABSTRACT

The increase in project implementations in the IoT field leads to the emergence of new needs. Long range, low power/ battery powered sensors and wireless communication protocols supporting these sensors are becoming increasingly popular. In this study, the characteristics of this new technology, which is defined in the literature as LPWAN (Low Power Wide Area Network), its differences from other technologies used in IoT networks and the power optimization techniques of Lora (long Range) sensors were examined through literature review and sample application.

**Keywords:** LPWAN, LoRa, Internet of Things.

### 1. GİRİŞ

Nesnelerin İnterneti (IoT: Internet of Things) uygulamaları oldukça geniş alanlara yayılarak yaşantımızı etkilemeye devam ediyor. Akıllı Şehir, Akıllı Tarım, Akıllı Fabrika alanlarında yapılan uygulama projelerin sayısı giderek artıyor. Uygulama kapsamı genişledikçe ve IoT ağına bağlanacak nesne sayısı artıkça yeni ihtiyaçlar ortaya çıkıyor [1]. Özellikle uzun mesafe veri iletiminde, düşük güç tüketimli sensörlerin çalışabilmesine olanak sağlayacak yeni iletişim teknolojilerine olan gereksinim her geçen gün artmaktadır [2].

LPWAN teknolojileri bu gereksinimi, boşluğu doldurmak üzere geliştirilmiş kablosuz iletişim protokolüdür [3]. Düşük güç tüketimine odaklı, pille çalışan IoT sensörler üzerinden küçük boyutlu veri paketlerini uzak mesafelere gönderebilmek amacıyla geliştirilen bu teknolojiyi diğerlerinden ayıran en önemli husus; sahadaki IoT sensörlerin, güç optimizasyonu teknikleri ile uzun yıllar pil ile çalışır (battery operated IoT sensor) durumda olabilmesidir [2,3]. Bu sayede oldukça geniş IoT ağları, yerel operatörlere bağlı kalınmadan oldukça ekonomik maliyetlerle kurulabilmektedir [2].

Bu çalışmada iki ana unsur irdelenmiştir.

- IoT ağlarında kullanılacak olan kablosuz iletişim protokollerin seçilmesindeki genel kriterlerin belirlenmesi,

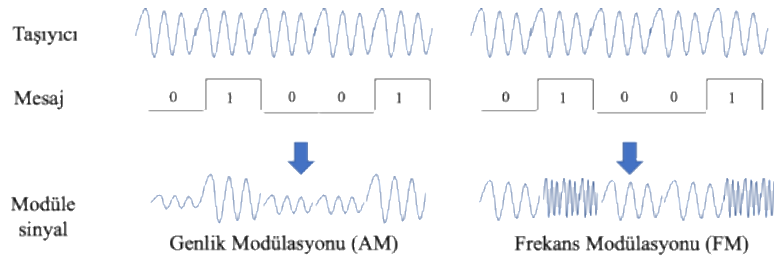
- LPWAN teknolojisinde kullanılan güç optimizasyon teknikleri.

## 2. KABLOSUZ İLETİŞİM

Kablosuz iletişim verinin radyo frekansı (RF: Radio Frequency) kullanılarak, elektro manyetik dalgalar üzerinden, havadan gönderilmesidir (RF ile kablolu iletişimde kurulabilir) [4]. Elektromanyetik dalgalar, antenler üzerinden oldukça uzak mesafelere yayılabilirler. Bu özellik, elektromanyetik dalgaların hava üzerinden veri iletiminde taşıyıcı olarak kullanılmasına olanak sağlar. Mesaj, modülasyon denilen tekniklerle elektromanyetik dalganın üzerine bindirilerek antenler üzerinden uzak mesafelere gönderilir.

### 2.1. Modülasyon

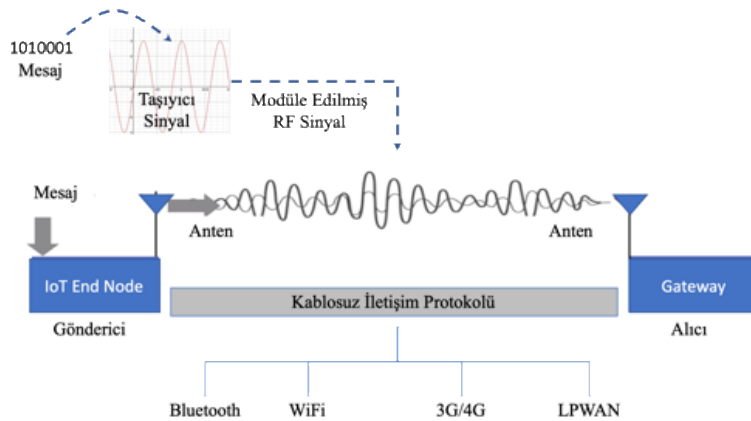
Günümüzde kullanılan birçok modülasyon tekniği vardır. Eğer, gönderilecek mesaj analog ise analog modülasyon (FM: Frequency Modulation, AM: Amplitude Modulation), dijital ise dijital modülasyon teknikleri (ASK, FSK, PSK) kullanılarak mesaj gönderilir. Alıcı (receiver) tarafta bulunan antenler elektromanyetik dalga içinden ayrıştırma işlemi yaparak (de-modülasyon) orijinal mesajı elde ederler. Modülasyon tekniğinde sinyalin genliği, frekansı ya da fazı ile oynanır. Örneğin, AM modülasyonda (Amplitude Modulation), '1' işareti daha yüksek genliğe sahipken, '0' işareti daha düşük genliğe sahiptir. FM modülasyon tekniğinde ise '1' işareti daha yüksek frekansa sahipken, '0' işareti daha düşük frekansa sahiptir. Şekil 1'de modülasyon teknikleri gösterilmiştir.



Şekil 1. Modülasyon teknikleri

### 2.2. Frekans Spektrumu ve İletişim Protokolleri

Radyo dalgalarının (taşıyıcı frekansı) çalışabileceği frekans aralığı 9 kHz ile 300GHz (Radio Frequencies Spectrum) arasında tanımlanmıştır [4]. Bazı frekans aralıklarını kullanabilmek için lisans bedellerinin ödenmesi gerekir: FM (88-108 MHz), GSM (1800 MHz), gibi. Ancak, Wi-Fi (2.4 GHz), Bluetooth (5 GHz) ve LoRa gibi (LPWAN, 868 MHz) iletişim protokolleri ISM (Industrial, Science, Medical) denilen frekans bandında çalışırlar ve lisans gerektirmezler [3].



Şekil 2. Kablosuz iletişim ve iletişim protokolleri.

IoT uygulamalarında farklı amaçlar için kullanılacak birçok kablosuz iletişim protokolü mevcuttur. Yakın mesafe düşük güç tüketiminde en yaygın kullanılan iletişim protokolleri RFID ve NFC 'dir (Near Field Communication). Küçük veri paketleri, 10 metreye kadar kısa mesafelere bu teknolojiler kullanılarak gönderilebilir (Proximity) [5,6]. Kısa mesafede, Bluetooth, Zigbee gibi iletişim protokolleri üzerinden küçük, orta boyutlu veri paketleri 50-100 metre arasında iletebilmektedir (WPAN: Wireless Personal Area Network) [4]. Orta mesafe ve güç tüketiminin çok önemi olmadığı uygulamalar için (1000 metreye kadar), Wi-Fi iletişim protokolleri kullanılır (WLAN: Wireless Local Area Network) [7]. Uzun mesafe, büyük veri paketleri için ise 4G/5G gibi hücreli (GSM) iletişim protokollerinden yararlanmaktadır (WWAN: Wireless Wide Area Network).

### 2.3. İletişim Protokollerinde Kısıtlamalar

Her şeyde olduğu gibi kablosuz iletişimde de bazı kısıtlar/tercihler vardır. Bunlar: Veri iletim mesafesi (range), veri paketinin büyüklüğü (bandwidth) ve güç tüketimi (power) gibi konulardır [2-4]. İdeal olarak, olabildiğince fazla yük (veri paketi), en uzun mesafeye, en düşük maliyetle gönderilmek istenir. Ancak bu üç bileşenin aynı anda elde edebilmesi pek olası değildir [2]. Örneğin: bir jet uçağı kargo uçağına göre daha hızlıdır, ancak daha az yük taşır ve yük başına maliyeti daha yüksektir. Veri de aynen bu şekilde bir yerden başka bir yere farklı taşıma araçları, teknolojiler (farklı frekans ve protokoller) ile bir şeyleri elde ederken, bir şeylerden feragat ederek (trade-off) gönderilebilir. Uygun yöntemle iletişimin sağlanabilmesi için kullanılacak teknolojinin/protokolün doğru olarak belirlenmesi gerekir. Bunun için öncelikle bazı sorulara cevapların verilmesi gereklidir.

### 2.4. IoT Proje İhtiyaçları ve LPWAN Teknolojileri

IoT proje uygulamalarını üç adımda değerlendirebiliriz. Tasarım, kurulum, operasyon & bakım. Tasarım aşamasında bağlantı noktası, buradan alınacak verinin özelliği ve iletişim gereksinimleri belirlenir [1]. Bağlantı noktası IoT Sensörün konumlanacağı lokasyondur. IoT sensörün ağ sunucusuna ya da gateway'e olan uzaklığı tasarım sürecinde düşünülmesi gereken ilk konudur. Bu aşamada sorulması gereken ilk soru: Veri ne kadar uzağa gönderilmek isteniyor? Veri, 10-100 cm arasında mı, 10-100 metre arasında mı yoksa 3-15 km arasında mı iletilecek?

Mesafe konusuna cevap bulduktan sonra veri karakteristiği ve gönderim sıklığı konusuna cevap aranması gereklidir [9]. Verinin ses, video, resim verisi gibi büyük mü, yoksa sensörden gelen sıcaklık, nem bilgisi gibi küçük boyutlu mu olduğu; veri güvenilirliği, zaman gecikmelerinin ne derece önemli olduğu ve veri gönderim sıklığı tartışılmalıdır. Paket büyüklüğü ve veri güvenliğinin yüksek olmasının istenmesi iletişim protokolü çerçevesinin de büyümesine; bu durum ise daha yüksek band genişliği ve enerji kullanımı ihtiyacını ortaya çıkarır. Yine benzeri durumda verinin sürekli gönderilmesi de daha fazla enerji tüketiminin olması anlamına gelir. Küçük paket verilerin gönderilmesi için daha az band genişliğine ihtiyaç vardır. Veri iletiminin sürekli değil de fasıllı olması (örneğin her 30 dk da'bir ya da bir koşula bağlı olarak), verinin bazen yanlış ya da geç gelmesi konusunda hassasiyetin çok yüksek olmaması gibi konular enerji tüketimini doğrudan etkileyen unsurlardır. Örneğin, saatlik sıcaklık ölçüm alınan bir yerden gelen verinin birkaç saniye geç gelmesi ya da aradaki bir verinin küçük bir sapma yapması gibi konular ihmal edilebilecek seviyelerde ise bu konuda gecikme ve veri hatası kabul edilebilir seviyededir denilebilir.

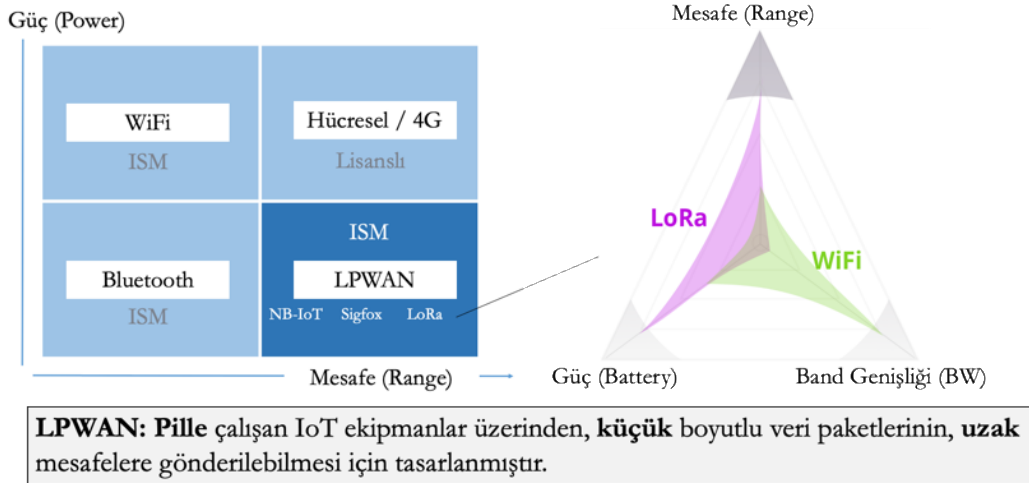
Son olarak düşünülmesi gereken konu ise sensörün ne ile besleneceğidir [5], [11]. Eğer sensörün enerji alabileceği bir besleme kaynağı varsa sorun yoktur (bina içi uygulamalar) ancak sensör kırsal ya da beslemenin olmadığı bir yerde konumlandırılacaksa düşük güç tüketimli sensörler tercih edilmelidir. Mesafe konusunda da uzaklık söz konusu olduğunda geniş alan ağında çalışabilecek düşük güç tüketimli sensörler üzerinden çözümler düşünülebilir (LPWAN: Low Powered Wide Area Network).

Kurulum aşaması IoT sensörlerin sahaya yerleştirilmesidir. Eğer güç beslemesi dışarıdan olacak ise sensöre bağlantı yapılması; besleme pil üzerinden olacak ise bağlantıya gerek olmadan kolayca kurulum yapılabilir. Operasyon ve bakım anlamında ise öncelikle saha bulunan yüzlerce sensörün güç kaynağından besleme alıp almadığının izlenmesi, gerektiğinde güç kaynağının yenilenmesi gibi unsurlar söz konusudur. Bu durumu bir akıllı tarım uygulaması üzerinden test edebiliriz.

Yüz farklı noktada toprağın nemini ve kuyu pompasının debisinin ölçülmesi/izlenmesi için bir uygulama tasarlanacaktır. Şimdi yukarıda tanımlanan soruları sorarak hangi iletişim teknolojisine gereksinimiz olduğuna bakalım.

- Veri ne kadar uzağa gönderilmek isteniyor? Ölçüm yapılan yer kırsal bir alan. Kontrol alanına 5-10 km mesafede.
- Gönderilecek verinin boyutu nedir? Akıllı tarım uygulamasında sadece sensör verisine ihtiyaç vardır. Yani veri küçük bir pakettir.
- Veri güvenilirliği ve gecikme ne kadar hassas? Verinin yanlış ya da geç gelmesi ne derece önemli? Uygulama yanlış, geciken veriyi ne derece tolere edebilir? Tasarlanan IoT projesi zamana hassas bir uygulama değildir. O nedenle veride gecikme veya kısmi veri kayıplar göz ardı edilebilir.
- Veri hangi sıklıkla gönderilmek isteniyor? Toprağın neminin her saniye ölçülmesine gerek yoktur. Belirli aralıklarla ölçmek ve ölçülen veriyi iletmek proje kapsamı için yeterlidir (her 15 dakikada bir mesela). Benzer şekilde pompa debisini de belirli aralıklar ile ölçüp, sadece eşik değerine geldiğinde sinyal alınması sağlanabilir.
- Veri gönderecek IoT ekipmanının güç kaynağı ne olacaktır? Elektrik olan bir yerde prize mi takılacak yoksa pille mi çalışacak? Projen kırsal alanda çalışacaktır. IoT sensörün elektriğe bağlanacağı bir yer mevcut değildir. Mecburen pil kullanılacaktır. Ancak, sensör bakım ya da pil değişimi gibi konular da dikkate alındığından, sensörün pil ile n az 3-5 yıl çalışır olması bir diğer beklentidir.

Bu durumu yorumlayacak olursak: Toprak üzerindeki 100 adet noktadan toplanan verileri nasıl iletilecektir? Proje kırsal alanda olduğundan dolayı mesafe kısa değildir. Mesafeden dolayı bluetooth, WiFi gibi teknolojiler tercih edilemez. Bu durumda GSM kullanılması düşünülebilir. 100 adet noktaya SIM Kartlı modüller takılıp, veriler GSM şebekesi üzerinden alınabilir! Bu durumda bu işin toplam maliyetinin ne olacağı ve sensörlerin hangi güç ile çalışacağı ve gündeme gelecektir. GSM standart olarak büyük veri paketlerini, sürekli göndermek üzere tasarlanan bir teknolojidir. Band genişliği çok yüksektir. Ancak, projede sadece sensör verisi (10 byte) iletilecektir. Ayrıca sensör tarafında SIM kart gerektirdiği için operasyonel olarak da pahalı bir çözümdür. [2].



Şekil 3. Güç ve Mesafe kriterlerine göre iletişim protokolleri

Örnek uygulama beklentisinde GSM teknolojisiyle aynı olan tek bir faktör vardır: Mesafe. Uzun mesafeye bilgi iletmek ancak bazı farklarla. Sürekli bilgi göndermek yerine ara ara ya da gerektiğinde bilgi göndermek. Bunun için daha dar band genişliği yeterli olacaktır. Band genişliğinin dar olması (small payload) ve iletişimin sürekli değil de ara sıra olması (uplink interval) güç tüketiminin daha az olmasına neden olur [5], [6]. Bu sayede IoT sensör yıllarca pil üzerinden çalışabilir.

Sürekli bilgi gönderiminin gerekmediği, güç tüketiminin ana konu olduğu, uzak mesafe IoT uygulamaları için farklı iletişim teknolojilere gereksinim vardır. Şimdilerde bu amaç için LPWAN (Low Power Wide Area Network) teknolojileri konuşulmaktadır. LoRa, Sixfox ve NB-IoT gibi teknolojiler bu alanı destekleyen teknolojilerdir [5].

### 3. KABLOSUZ İLETİŞİM

LPWAN IoT sensörler genel olarak dört farklı modda bulunur ve her modda farklı enerji gereksinimi vardır [3].

- Uyku Modu (Sleep): IoT sensörün hiçbir şey yapmadan beklediği, enerjinin en az tüketildiği moddur. LoRa sensörler bu modda ortalama 0.04 mAsaat akım çekerler (Güç, gerilim ile akımın; Enerji ise güç ile zamanın çarpımıdır).
- Okuma Modu (Active): IoT sensörün uyku modundan kalkıp, sensör bilgisini okuma moduna geçmesidir. LoRa sensörler bu modda 8 mAsaat akım çekerler.
- İletim Modu (Send): Sensörden okunan bilginin RF sinyal üzerinden gönderilmesidir. LoRa sensörler 50 mAsaat akım ile en fazla enerjiyi bu modda çekerler.
- Dinleme Modu (Listen): İletinin gönderilmesi akabinde, iletinin durumu hakkında karşı tarafın dinlenmesi sürecidir. LoRa sensörler bu modda ortalama 11 mAsaat akım çekerler.

LPWAN teknolojileri, güç tüketimini optimize edebilmek için aşağıdaki konulara odaklanır [2,3,8,9,14,15].

- Enerji devşirme (Energy harvesting)
- Düşük band genişliği (Frame/Payload)
- Veri gönderim sıklığı (Up-link Interval)
- Bilişimde hız (FOG Computing)
- Güç optimizasyonu (ADR: Adaptive Data Rate)

#### 3.1. Enerji Devşirme (Energy Harvesting)

IoT ekipmanın ortamdaki ısı, titreşim, güneş, rüzgâr gibi faktörler aracılığıyla dış ortamdan enerji temin edebilmesidir. IoT ekipmanlar data gönderim esnasında çok düşük akım çekerler. Çok sık gönderim yapılmayan durumlarda, dış ortamdan elde edilen enerji IoT ekipmanın birkaç defa veri transferi yapabilmesine yetebilmektedir. Örneğin, sıcak bir fincan kahveden yayılan ısıdan elde edilen enerji ile IoT ekipman bir sefer ileti yapabilmektedir.

#### 3.2. Düşük Band Genişliği (Small Frame/Payload)

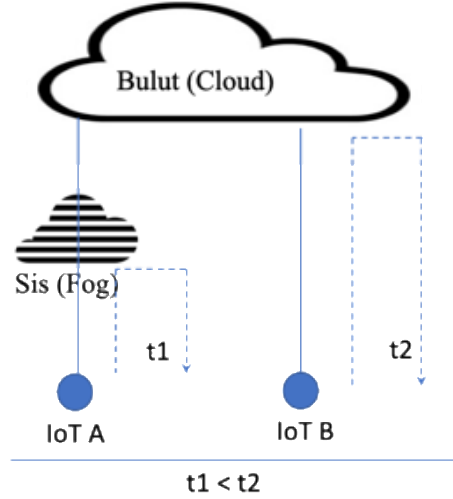
LPWAN uygulamalarının avantajlarından bir diğeri, LPWAN teknolojisinin sadece sensör verisi ile ilgilenmesidir. WiFi, GSM gibi protokollerde olan büyük çerçeve (frame/payload) yapıları yerine çok daha küçük çerçeveler içinde veri iletimi gerçekleştirirler. Yaklaşık 10 byte büyüklüğünde veri paketleri göndermek için daha düşük band genişlikleri yeterli olabilmektedir. Bu da daha az enerji gereksinimi demektir.

#### 3.3. Veri Gönderim Sıklığı (Uplink Interval)

Yukarıda bahsettiğimiz gibi LPWAN teknolojisi fasıllı çalışma ya da süreç koşulu izlemek (condition monitoring) üzere kurgulanan bir yapıdır. Sürekli bilgi okumak ve göndermek maliyetlidir, fazla enerji gerektirir. Oysa LPWAN'da kesikli aralıklarla ya da belirli şartlar oluştuğunda iletim gerçekleşir. Bu durum enerji tüketimini indirgemektedir.

#### 3.4. Hız (FOG Computing)

IoT cihazlar büyük miktarda sensör verisi üretirler. Bu verileri depolamak, analiz etmek ve buradan anlamlı sonuçlar çıkarmak için bilişim kaynaklarına ihtiyaç vardır. Bu ihtiyaca en uygun çözümlerin bulut ortamında olmasına rağmen, bazı durumlarda bulut üzerinden çözüm sağlanması ihtiyacı karşılamaya yeterli gelememektedir [2,10].



Şekil 4. Sis ve Bulut Teknolojileri

- Mobilite: Mobil IoT cihazlarının konumlarının değişmesi ve buna bağlı olarak bağlı oldukları ağ koşullarının da değişken olması, bulut üzerindeki veri merkezi ile güvenilir iletişim kurmayı zorlaştırabilir.
- Gecikme (Latency) ve Güvenirlik: Bulutla iletişim kurmak ve yanıtların geri alınması zaman alır. Özellikle zaman kritik bazı IoT uygulamalarında karar verme sürecinde gecikme asla istenmez (örneğin otonom sürüş) [5,10]. Bulutla iletişime geçen cihaz sayısının artması bu gecikmeyi daha da artırabilir. O nedenle, gerçek zamanlı yanıtlara ihtiyaç duyan ve zamana karşı hassas uygulamalar için bulut üzerinden sürecin yönetilmesi uygun olmayabilir. Ayrıca, bazı ortamlarda kablosuz bağlantı kalitesinin iyi olmaması nedeniyle iletişim kayıpları olabilir [10,15].
- Güç kısıtlamaları: Bulut üzerinden iletişime geçilmesi daha fazla güç, enerji gerektirir. Bu durum pil ile çalışan IoT cihazlarının pil ömrünün daha erken azalmasına neden olur. Bu sorunların etkisinin en aza indirgenebilmesi için bazı depolama, işleme ve analiz işlemlerinin IoT cihazı üzerinde ya da ona en yakın olan yerlerde (Gateway) yapılabilmesi üzerine çözümler geliştirilmektedir. Bazı mikro işlemciler ve gatewayler kendi içlerindeki hafıza sayesinde küçük miktar da olsa verileri depolayabilmekte ve veri analitiği yapabilmektedirler. Bilişim kaynaklarına her zaman bulut üzerinden değil de gereken durumlarda ağın IoT cihaza en yakın kenarından (Edge) sağlanabilmesi konsepti Fog (Sis) ya da Edge (Kenar) bilişim olarak adlandırılır [15]. Fog, yere yakın bir bulut olarak görülebilir. Veriler, pahalı iletişim ortamları yoluyla buluta gönderilmeden önce ağın kenarında depolanabilir, işlenebilir, filtrelenebilir ve analiz edilebilir. Sis ve bulut paradigmaları birlikte kullanılırlar. Her ikisi de IoT uygulamalarının optimum performansı için gereklidir [2,16].

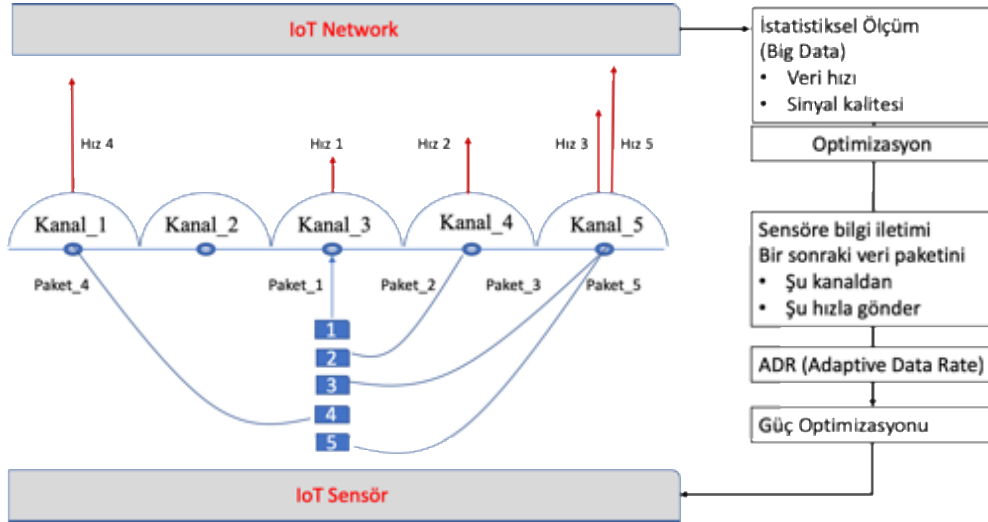
### 3.5. Güç Optimizasyonu (ADR:Adaptive Data Rate)

IoT sensörde en çok güç tüketimi bilgi gönderimi (sending mode: on air time) aşamasında olur. O nedenle bu sürenin kısa olması daha az güç tüketimi açısından avantajdır. LPWAN modülasyon tekniğinde adaptif veri hızı (ADR: Adaptive Data Rate) ayarlaması yapılır [3]. Örneğin, arabanızla otobanda gittiğinizi düşünelim. Otobanda farklı şeritler (kanal), şeritlerin üzerinde farklı yükler taşıyan araçlar vardır. Kamyonlar, otomobiller, spor otomobiller ile otoban şeritlerini ortaklaşa kullanırsınız. Yolum durumuna göre (hava koşulları, trafik sıklığı, trafik lambaları) bazen sol şeritten, bazen orta ve bazen de en sağ şeritten, sürekli farklı hızlarla gidesiniz. Hatta durduğunuz bile olur. Sürekli aynı şeritten, aynı hızla gitmek neredeyse olanaksızdır.

Kablosuz iletişimde de benzer durumlar vardır. IoT ağında bulunan birçok sensör veri iletimi için, aynen otoban şeritleri gibi, farklı frekanslardan oluşan kanalları ortaklaşa kullanırlar (frekanslar arası mesafe kanal yani band genişliğini oluşturur, 868.1, 868.2 ... gibi). Eğer, sensörlerin hangi kanalı kullanacağı

özel olarak tanımlanmamışsa, sensörler rasgele bir kanal seçerek, seçtikleri kanal üzerinden, tanımlanmış bir hız ile veri aktarımı sağlamayı denerler. Ancak bu statik durum her zaman faydalı sonuç vermez. Ortam şartları (hava durumu, fiziksel engelleri vs.) veri kalitesinde sorunlara; verinin hızlı gönderilmesi veri kayıplarına neden olabilir (nasıl hızlı konuşan insanlarda, bazı heceler karşı taraftan anlaşılabilir ise veri iletiminde de veri (hece) kayıpları yaşanabilir). Bu durumda hızın düşürülmesi gerekebilir.

Benzeri başka bir durumda ise mevcut kullanılan kanal, o an başka IoT sensörler tarafından aşırı yoğun bir şekilde kullanılırken, başka kanallar o derece yoğun olmayabilir. Bu durumda mevcut kanaldan veri göndermek, hızı azaltacağı ve havada kalma süresini (on air time) uzatacağından dolayı daha fazla enerji harcanmasına sebep olabilir [3]. Bu gibi durumlarda iletim için en uygun kanalın seçilmesi gerekir.



Şekil 5. Adaptif Veri Hızı

LPWAN teknolojilerinde, gönderilen verinin, hangi kanaldan geldiği, karşı tarafa ne kadar sürede ulaştığı, sinyal kalitesi (signal to noise ratio) sürekli olarak ölçümlenir, istatistiki tablolar oluşturulur. Bu ölçümlerin sonucuna göre optimizasyon yapılır ve sensöre, bir sonraki verinin hangi kanaldan (hangi frekans), hangi hızda (data rate) gönderilmesi gerektiği bilgisi iletilir. Sensor, bu yönlendirmeye göre veri hızını artırır/azaltır ve uygun kanala geçer. Bu sayede güç optimizasyonu sağlanmış olur.

#### 4. LPWAN ÖRNEK UYGULAMA

Uygulamamızda IoT sensörün, düşük güç tüketim ortamında; (a) bir pil ile ne kadar süre çalışabileceğini, (b) günlük kaç adet mesaj iletebileceğini ve (c) bir IoT ağına (gateway) aynı anda kaç sensör bağlanabileceğini hesaplanacaktır. Sensör her 15 dakikada (uplink interval:  $T=15$  dk.=900 sn.) bir bilgi gönderecektir. Yani çalışma periyodu (çerçeve) 900 saniye olacaktır. Her periyotta, tüm modlar bir kere gerçekleştirilecektir. Yani sensör bir kere okuma, bir kere gönderme, bir kere dinleme ve bir kere (geri kalan süre) uyku modunda olacaktır. Gerekli hesaplamaları tablo 1’de yaptığımızda, IoT Sensörün her periyotta toplam 0.01186 mA akım çektiği görülmektedir. T: 15 dakika olduğuna göre, bu işlemi saatte dört defa gerçekleştirecek ve bir saat süresince toplam çekeceği akım 0.04744 mA olacaktır. Bir pil bir saat ’de ortalama 2000 mA akım verebilir. Bu duruma göre saatte 0.04744 mA akım çeken bir IoT sensör bu pil ile yaklaşık 4,81 yıl beslenebilecektir (a şıkkı).



**Çizelge 1.** Uygulama verileri ve hesaplaması

| Mod  | Süre                               | Akım       |
|--|------------------------------------|------------|
| 1. Okuma Modu (Active)                         | 180 ms                             |            |
|  | $(0.18 / 3600) \times 8$           | 0.00040 mA |
| 2. İleti Modu (Send)                           | 60 ms                              |            |
|  | $(0.06 / 3600) \times 50$          | 0.00083 mA |
| 3. Dinleme Modu (Listen)                       | 2.14 ms                            | 0.00065 mA |
|  | $(2.14 / 3600) \times 11$          |            |
| 4. Uyku Modu (Sleep)                           | 897.62 ms                          |            |
| $T - (0.18 + 0.06 + 2.14) = 897.62 \text{ ms}$ | $(897.62 / 3600) \times 0.04$      | 0.00998 mA |
|  |                                    |            |
| Toplam (T süresince, yani 15 dk)               | 900 ms                             | 0.01186 mA |
| 1 saat boyunca (60/15 = 4 defa)                | 3600 ms                            | 0.04744 mA |
|  |                                    |            |
| Pil: 2000 mAH                                  | $(2000/0.04744) / (24 \times 365)$ | 4.81 Yıl   |

IoT ekipmanlar bir gateway üzerinden internete erişirler. Gateway'ler protokol dönüştürücülerdir [4]. Örneğin, LPWAN protokolünde gelen bilginin internet ortamında iletilebilmesi için uygun TCP / IP protokolüne dönüştürülmesini sağlarlar. Tüm network ağlarında gateway'e bağlantı sayısı sınırlaması verilir. Ağ etkin yönetebilmek için bu gereklidir. Örneğin, biz baz istasyonuna aynı anda bağlanacak kişi sayısı sınırlıdır. O nedenle konser, maç gibi organizasyonlarda bölgedeki bağlantı sayısını artırabilmek için mobil baz istasyonlar getirilir.

LPWAN uygulamalarında bazı uygulamalarda (TTN network) kaç IoT sensörün bir adet gateway'e bağlanacağı, IoT sensöre tanınan günlük havada kalma süresine göre belirlenir. Örneğin, TTN networkte IoT sensör başına günlük toplam havada kalma zamanı (total on-air time) 30 saniyedir. Bunun anlamı: LPWAN IoT sensörün ortalama havada kalma yani bilgiyi iletme süresinin 60 ms olduğudur. Toplam 30 saniyesi olan bir sensör günde,  $30/0.06 = 500$  defa bilgi gönderebilir (b şıkkı). Başka bir ifade ile yaklaşık 3 dk'da bir veri iletişimi gerçekleştirebilir. Bir gün,  $24\text{saat} \times 60\text{dk} \times 60\text{sn} = 86.400$  saniye yapar. Ortalama bir mesaj 60 ms olduğuna göre, günde ortalama  $86400/0.06 = 1.440.000$  mesaj alınabilir. Bu rakamı da sensör başına maksimum sayı olan 500'e bölersek 2.880 sayısına (c şıkkı) yani kaç sensörün bağlanacağı bilgisine ulaşırız.

## 5. SONUÇ VE TARTIŞMALAR

LPWAN protokolü ile 8-10 km mesafelere kadar veri iletimi yapılabilmektedir. Bununla beraber LPWAN protokolünün en önemli getirisi batarya ve düşük enerji tüketimi ile çalışabiliyor olmasıdır. Bu sayede özellikle kırsal alanlar ya da IoT sensör bakım/onarım işleminin çok sık yapılabilmesinin pek mümkün olmadığı uygulamalar için oldukça uygundur.

LPWAN protokolü ISM bandı içinde olduğu için lisans ücreti gerektirmemektedir. Bu özellik sayesinde işletmeler ya da kurumlar herhangi bir operatöre bağlı kalmadan, çok daha düşük maliyetlere kendi özel IoT ağlarını kurabilme olanağına sahip olabilmektedirler.

Ortalama bir LPWAN IoT gateway'e 2500/3000 civarında sensör bağlanabilmektedir. Bu özellik özellikle geniş kapsamda, çok noktadan ekonomik düzeyde veri alınabilmesine olanak sağlamaktadır. Örneğin, bir belediyenin otopark alanlarının boş olup olmadığını denetlemek, organize sanayi bölgeleri ya da havaalanları gibi geniş kampüs alanlarında IoT uygulamalar yapılabilmesi açısından oldukça elverişli olduğu gözükmemektedir.

IoT uygulamaların giderek her alana yayılması ve kontrol edilecek her noktada bir sensörün olması mesafe ve güç tüketimi konusunun önemini giderek daha da önemli hale getirmektedir.

## KAYNAKLAR

1. Rymaszewska, A. at all, “IoT powered servitization of manufacturing – an exploratory case study”, International Journal of Production Economics Vol.192, Pages 92–105, 2017
2. Apilioğulları, L. “Dijital Dönüşüm”. Birinci baskı. İstanbul, Türkiye, Aura, 2019.
3. Lora Alliance Introduction. <https://lora-alliance.org> , September, 21, 2019.
4. Vermesan, O., at all, “Internet of Things Cognitive Transformation Technology Research Trends and Applications”, River Publisher Series in Communications, 2015.
5. Darmois, E., at all, “IoT Standards Landscape – State of the Art Analysis and Evolution”, River Publisher Series in Communications, 2015.
6. Darmois, E., at all, “IoT Standards Landscape – State of the Art Analysis and Evolution”, River Publisher Series in Communications, 2015.
7. Rohen, M., “IoT Driving Digital Transformation – Impact on Economy and Society”, River Publisher Series in Communications, 2015.
8. Sethi P, Sarangi S. Internet of Things: Architectures, Protocols, and Applications, Journal of Electrical and Computer Engineering, Article ID 9324035, p.25, 2017.
9. DUCROT N, Ray D. LoRa Device Developer Guide, Orange IT Solutions, 2016
10. Lammler T. Cisco® Certified Network Associate Study Guide, Sixth Edition, Wiley Publishing, Inc. 2007
11. Mekki K, Bajic E. A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment, ICT Express, Vol. 5, Issue 1, Pages 1-7, 2019.
12. Muthumanickam, T, Sheela T. Low Power Technologies For Iot Applications, International Journal of Engineering Inventions, Vol. 7, Issue 9, Pages 32-37, 2018.
13. Internet of Things (IoT) Glossary of Terms. [https://www.belimo.com.au/mam/americas/pictures\\_and\\_graphics/marketing/teaser\\_images/iot/MAN18\\_Belimo\\_IoT\\_Glossary\\_EN-US.pdf](https://www.belimo.com.au/mam/americas/pictures_and_graphics/marketing/teaser_images/iot/MAN18_Belimo_IoT_Glossary_EN-US.pdf) , October, 12, 2019.
14. Song Y, et al. An Internet of Energy Things Based on Wireless LPWAN, Engineering Vol.3, Pages 460–466, 2017.
15. LinkedIn Learning, <https://learning.linkedin.com> , September, 12, 2019.
16. Apilioğulları, L. “Dijital Dönüşümün Yol Haritası”. Birinci baskı. İstanbul, Türkiye, Aura, 2018.