



LPWAN Teknolojileri ve Uygulama Alanlarının Karşılaştırmalı İncelemesi

Elvan DUMAN^{1*}, Münüre Ezgi ALTINTAŞ², İclal GÜL³, Muhsin DOLU⁴

^{1,2,3,4} Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Bucak Teknoloji Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Burdur, 15300, Türkiye

Özet

Geniş kapsama, düşük maliyet, aygıt bağlanma kapasitesi ve düşük enerji tüketimi gibi IoT gerekliliklerini yerine getirmesinden dolayı Düşük Güç Geniş Alan Ağı (LPWAN) teknolojileri nesnelerin interneti uygulamalarında önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmada önde gelen LPWAN teknolojileri olan LoRa, Sigfox ve NB-IoT ile bu teknolojilerin karakteristik özellikleri verilmiştir. Bunun yanında LPWAN teknolojilerinin yetenekleri ve kısıtlılıklarının ortaya çıkardığı uygulama alanları ve farklılaşmaları sunulmuştur. Çalışma, LPWAN teknolojilerinin geleceğine ışık tutacak çıkarımlar ve yönlendirmeler ile sonlandırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Nesnelerin interneti, Kablosuz Haberleşme, Lpwan, Lora, Sigfox, Nb-iot

Makale Bilgisi

Başvuru:

12/08/2022

Kabul:

19/09/2022

A Comparative Review of LPWAN Technologies and Application Areas

Abstract

Low Power Wide Area Network (LPWAN) technologies play an important role in IoT applications, as they fulfill IoT requirements such wide coverage, low cost, device connection capacity and low energy consumption. In this study, the leading LPWAN technologies; LoRa, SigFox, NB-IoT, and the characteristics of these technologies are given. In addition, the application areas and differentiations revealed by the capabilities and limitations of LPWAN technologies are presented. The study closes with conclusions and directions that will shed light on the future of LPWAN technologies.

Keywords: Internet of Things, Wireless communication, Lpwan, Lora, Sigfox, Nb-iot

^{1*} İletişim e-posta: eduman@mehmetakif.edu.tr

1 Giriş

Son yıllarda Nesnelerin İnterneti (IoT) kavramının ortaya çıkışıyla birlikte ev, çevresel kontrol, ulaşım, sanayi ve tarım gibi alanlarda teknolojik yenilikler sunulmuş, bu teknolojilerinin kullanımıyla insan yaşamında büyük değişimler meydana gelmiştir [1,2]. Nesnelerin birbiriyle konuşması, birbirini dinlemesi ve aldıkları komutlarla harekete geçmesi temel prensibine dayanan IoT teknolojisi, bu yolla nesnelerin birbirleriyle iletişim kurarak akıllı hale gelmesini sağlamıştır [3,4]. İnternete bağlı nesnelerin kullanımının hızla artması ve teknolojisinin gelişmesi, yüksek enerji ihtiyacına gerek duymaksızın nesnelerin hareketli hale gelmesini sağlayan kablosuz iletişim teknolojisi Düşük Güç Geniş Alan Ağı (Low Power Wide Area Network, LPWAN) sistemlerini ortaya çıkardı. LPWAN teknolojileri düşük maliyet, geniş kapsama alanı ve düşük güç iletişim özellikleri sayesinde gelişmiş IoT uygulamalarının gereksinimlerini karşılamaktadır [5]. LPWAN teknolojileri sanayi ve tarımdan, sağlığa kadar geniş bir yelpazede uygulama alanları oluşturmaya, dolayısıyla büyük bir markete sahip olmaya başlamıştır.

Geniş coğrafi alanlarda çoğu zaman güç kaynağına erişim olmaması ve güç kaynağı değişikliklerinin maliyeti sebebiyle LPWAN teknolojisi düşük maliyetli ve az güç tüketimi yapan aygıtlarla geniş alanlarda çalışarak haberleşmeyi mümkün hale getirmektedir [6]. Bu teknolojiler, enerji tüketimini azaltmak için sürekli veri göndermek yerine aralıklarla uyanıp veri göndermenin (uplink interval) yanı sıra, veri paketleri ve iletişimde kapasite ve yöntem hafifliğinden yanadır. Bu sayede sistemler yıllarca tek bir pil kaynağı ile uzun süre çalışabilmekte; küçük boyutlu ve verilerin aralıklı gönderimine uygun tüm problemler için çözümler önermektedir. Teknik özellikleri, maliyetleri, güç tüketimi, veri iletim hızı ve yöntemleri başta olmak üzere özelliklerine göre sınıflandırılan LPWAN teknolojilerinin en yaygın bilinen ve farklı sınıflarda öne çıkanları LoRa, Sixfox ve NB-IoT olmuştur.

Bu çalışmada özellik ve kullanım bakımından farklılaşan ve önde gelen LPWAN teknolojilerinden olan LoRa, Sigfox ve NB-IoT ele alınmıştır. Her bir teknoloji çalışma mantığı, teknik özellikleri, avantaj ve sınırlılıklarıyla incelenmiş, güçlü ve zayıf yönleri ortaya konulmuştur. Servis kalitesi, enerji verimliliği, gecikme, ağ ve kapsama alanı ve maliyet açısından karşılaştırılmıştır. LPWAN teknolojilerinin akıllı bina, akıllı şehir, akıllı tarım,

akıllı sayaç ve akıllı ulaşım gibi uygulama alanları hakkında yapılan etkili çalışmalar sunulmuştur. Çalışmalarda hangi LPWAN teknolojisinin yaygın olarak kullanıldığı ve gerekçeleri teknolojilerin özellikleri açısından tespit edilerek anlamlandırılmıştır. LPWAN teknolojileri ve literatür incelemesi neticesinde teknolojilerin kullanım alanları ve geleceği hakkında tartışma ve görüşler sunulmuş çalışmada sonuçlandırılmıştır. Çalışmanın literatüre genel katkıları şu şekilde özetlenebilir:

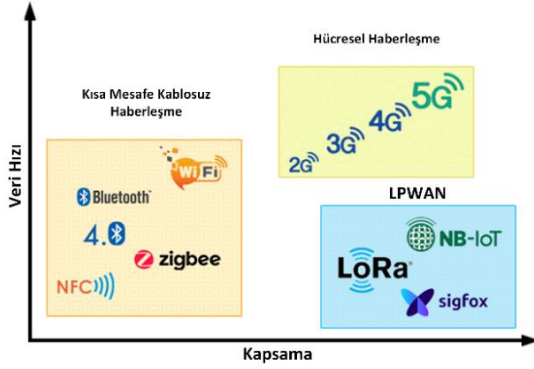
- Yaygın LPWAN teknolojileri temel ve teknik özelliklerine odaklanarak kapsamlı bir inceleme yapılmıştır.
- Teknolojilerin teknik karşılaştırılması yanı sıra uygulama alanlarındaki durumları da kategorik olarak sunulmuş ve eğilimler gerekçelendirilmiştir.
- Literatür araştırması neticesinde problemlere uygun LPWAN çözümlerini bulacak temel bilgi ve yönlendirme sunulmuştur.
- Bilindiği kadarıyla literatürdeki LPWAN teknolojilerinin karşılaştırıldığı ilk ulusal çalışmadır. Teknik karşılaştırma ve literatür çalışması birlikte verilmesinin yanında teknik özelliklerle literatürdeki çalışmaların gerekçelendirilmesiyle uluslararası çalışmalara katkı sağlamaktadır.

Çalışmanın geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir. Bölüm 2'de LPWAN teknolojisi ve özellikleri sunulmuştur. Bölüm 3'te LPWAN teknolojileri çeşitli parametreler açısından karşılaştırılmıştır. Bölüm 4'te Uygulama alanlarına yönelik literatür çalışması verilmiştir. Bölüm 5'te araştırma ve tartışma bulgularıyla çalışmaların geleceği yönünde fikirler verilmiş, çalışma sonuç bölümüyle sonlandırılmıştır.

2 LPWAN teknolojileri

LPWAN başlığı altında bulunan birçok haberleşme teknolojileri temelde kapsama alanı ve veri hızı açısından karşılaştırılmıştır. Kablosuz haberleşme teknolojilerindeki LPWAN'ın yerini daha iyi anlayabilmek için Şekil 1'de kablosuz iletişim teknolojilerinin kapsama ve veri hızı noktasında kapasiteleri verilmiştir. Görüleceği üzere LPWAN teknolojileri kapsama alanı göre diğer teknolojilerden daha iyi imkânlar sunmaktadır [7]. Diğer taraftan hücreli haberleşme de geniş kapsama alanı sağlarken, yüksek enerji tüketimiyle LPWAN'lardan farklılaşmaktadır. LPWAN

teknolojilerinin önemli kısıtları ise düşük veri iletim kapasitesi ve hızıdır.



Şekil 1. Kablosuz haberleşme teknolojilerinin mesafe ve veri hızı kapasiteleri

Bilindiği üzere veri kapasitesi, hızı, iletişim mesafesi, enerji tüketimi konuları arasındaki tercih bir takas olayıdır. Bir veya iki alanda avantaj sağlanırken diğer alanlarda kısıtlı konuma geçilmektedir. LPWAN teknolojileri her ne kadar düşük güç ve geniş kapsama alanı vadetse de kendi içlerinde maliyet, hizmet kalitesi, kapsama alanı, enerji tüketimi konularında farklılıklar göstermektedir. Bu farklılıklar ise uygulama alanlarına göre LPWAN teknolojilerini avantajlı veya dezavantajlı konuma getirmektedir. Araştırma probleminde uygun teknolojiyi seçmek ve gelecek fırsatların farkında olabilmek için önde gelen teknolojiler ve farklılıkları hakkında detaylı bilgi edinmek gerekir. Bu bölümde önde gelen teknolojiler olan LoRa, Sigfox ve NB-IoT teknik olarak sunulmuştur.

2.1 LoRa

LoRa 2009 yılında bir Fransız girişimi olan Cyclo aracılığıyla ilan edilmiş ve 2012 yılında Semtech tarafından satın alınarak patentlenmiştir. Buna ek olarak 2015 yılında LoRa-Alliance tarafından standartlaştırılması tamamlanmıştır [8]. Bu tarihten itibaren birçok ülkede kullanılmaya başlanan LoRa, şu anda dünya çapında birçok uygulama alanında yaygın teknoloji konumundadır. LoRa lisanssız Sınai, Bilimsel ve Tıbbi Cihaz (Industrial Scientific Medical, ISM) frekans bandında Avrupa ülkelerinde 868 MHz, Birleşik Devletlerde 915 MHz ve Asya kıtasında 433 MHz değerinde yayın yapmaktadır [9].

LoRa, uzun mesafe iletimi sağlayabilmek adına kullanılan kablosuz modülasyon yöntemi veya bir diğer ifadeyle fiziksel katmandır. Geleneksel kablosuz haberleşme teknolojilerinin fiziksel

katmanda kullandıkları bir modülasyon olan Frekans Kaydırmalı Anahtarlama (Frequency-shift keying, FSK) modülasyonun aksine LoRa, Cıvıtlı Yayılımlı Spektrum (Chirp Spread Spectrum, CSS) modülasyonu kullanmaktadır. Bu sayede düşük güç tüketimi yeteneğine ilaveten uzun iletim mesafesi olanağına da sahip olmaktadır [10].

LoRaWAN ise LoRa'nın ağ mimarisi ve iletişim protokolüdür. Uç cihazın hizmet kalitesi, pil ömrü ve güvenliğini belirleyen en önemli faktörler bu ağ mimarisi içerisinde yer almaktadır. LoRaWAN yıldız ağ topolojisini kullanır. İlgili topolojide süreç üç aşamalı bir dizilimden oluşur. Süreçte sensör gibi uç düğümler aracılığı ile toplanan veriler kapsama alanındaki ağ geçitlerine iletilir. Uç düğümler hücrel iletişimde olduğu gibi herhangi bir ağ geçidi ile ilişkilendirilmemektedir. Uç düğüm tarafından iletilen veriler onu duyabilme ihtimaline sahip tüm ağ geçitleri tarafından dinlenir. Kullanılan bu yöntemle paket kayıplarının önüne geçmek hedeflenmektedir. Topolojinin ikinci adımında ağ geçidine iletilen veriler hücrel, ethernet veya uydu ile sunuculara iletilir. Güvenlik kontrolleri ve iletilen çoklu paketlerin filtrelenmesi ikinci aşamada sağlanır. Son olarak ağ sunucusunda hazır halde bulunan veriler istenildiği takdirde uygulama sunucularına iletilir.

2.2 Sigfox

Sigfox, patentli teknolojisiyle uçtan uca makineler arası haberleşmeyi sağlayan LPWAN ağ operatörüdür. Sigfox baz istasyonları ile uç noktadaki aygıtların ikili faz kaydırmalı anahtarlama (binary phase-shifting keying, BPSK) yardımıyla 100 Hz ISM ultra dar bant içinde bağlanmaktadır. Maksimum 100 bps iletme imkân sağlayarak frekans bant genişliğini verimli kullanır ve düşük gürültü seviyelerinde iletim sağlar. Uç aygıttan istasyonu uplink 12 bayt ve günlük toplam 140 mesajla sınırlıdır. Dahası istasyondan uç birime doğru haberleşmeyi ifade eden downlink günlük 4 mesaj ve 8 bayt ile sınırlıdır. Bu da istasyona gelen tüm veri için bilgilendirme mesajı göndermeyi veya istasyondan uç noktaya komut gönderilmesi gereken uygulamaları kısıtlamakta ve servis kalitesini düşürmektedir. Bu problemle başa çıkabilmek için uç aygıt mesajını rastgele varsayılan olarak 3 farklı frekans kanallarından çoklu olarak yayımlar.

2.3 NB-IoT

NB-IoT 2016 yılında 3GPP'nin 13. sürümde bahsedilmiş ve standartlaştırılmıştır [7]. Bu

tarihten itibaren Dünya genelinde kullanımı hızla artış göstermiştir. NB-IoT'nin LoRa ve Sigfox'un aksine lisanslı bir frekans olan Uzun Süreli Evrim (Long Term Evolution, LTE) bandını kullanmaktadır ve mevcut baz istasyonlarının kullanımını mümkün hale getirerek kurulum maliyetlerini düşürmektedir. NB-IoT lisanslı LTE frekans bandını kullanırken üç farklı çalışma moduna sahiptir. Bunlardan ilki bağımsız çalışma modudur. Bağımsız çalışma biçiminde NB-IoT frekanslarının yerleşimi, 200 kHz bant genişliğine sahip bir veya daha fazla fiziksel kaynak bloğu (Physical Resource Block, PRB) alan mevcut frekans spektrumuna tahsis edilir. İkinci çalışma modu ise koruma bandı modudur. Senaryoda, NB-IoT frekansı, 180 kHz bant genişliğine sahip bir veya daha fazla PRB alan mevcut LTE frekansının koruma bandını kullanır. Son mod ise literatürde bant içi çalışma modu olarak yer almaktadır. NB-IoT frekansı, 180 kHz bant genişliğine sahip bir veya daha fazla PRB alan mevcut LTE frekans bloğu içinde kullanılır [11].

NB-IoT LTE teknolojisi olmasına rağmen uzun pil ömrünü ve enerji verimliliğini sağlamak adına Genişletilmiş Kesintili Alım (Extended Discontinuous Reception, eDRX) ve Güç Tasarruf Modu (Power Saving Mode, PSM) yöntemlerini kullanarak güç tüketimini azaltmaktadır [11]. PSM modunda ağ üzerinde yer alan cihazlar faaliyetlerini neredeyse durdurup derin bir uyku durumuna geçmekte ve bu durumda cihaza ağ üzerinden ulaşım sağlanamamaktadır. Ancak tasarımda veri iletim zamanlarında cihazın kendiliğinden uyanması mümkündür. 3GPP tarafından geliştirilen ve 3GPP Release13'te tanımlanan eDRX modunda ise ağ üzerinde yer alan cihazlar belirli süreliğine bekleme durumuna geçmektedirler. NB-IoT uplink ve downlink olmak üzere iki yönlü veri iletimi yapabilecek şekilde tasarlanmıştır. NB-IoT hem uplink hem de downlink şemasında en az 180 kHz bant genişliğine ihtiyaç duymaktadır. Çok perdeli iletimde Tek Taşıyıcı Frekans Bölmeli Çoklu Erişim (Single Carrier Frequency-Division Multiple, SC-FDMA) şemasını kullanmaktadır. Bu şema 15 kHz alt taşıyıcı aralığı ve 0,5 ms yuvalı 180 kHz toplam bant genişliğine sahiptir. Tek perdeli iletimde ise 15 kHz ve 3.75 kHz alt taşıyıcı aralığını desteklemektedir.

LPWAN teknolojilerinin birbirleriyle birçok yönden karşılaştırılması, bir uygulama alanına ait problem ele alınırken yöntemin ve yöntemin özelliklerinin en uygun şekilde seçilmesine katkı sağlayacağı

düşünülmektedir. Problem için gerekli servis kalitesi, enerji verimliliği, ölçeklendirilebilirlik, yük uzunluğu, kapsama alanı, kurulum ve maliyet gibi birçok etmen göz önünde tutulmaktadır. Bu sebeple çalışmada LoRa, SigFox ve NB-IoT teknolojileri birçok açıdan ele alınmıştır.

3 LPWAN teknolojilerinin karşılaştırılması

3.1 Servis kalitesi

LoRa ve Sigfox lisanssız spektrum ve asenkron iletişim protokolü kullanırken, NB-IoT LTE temelli protokol ve lisanslı spektrum kullanarak diğer teknolojilere göre çok daha iyi bir servis kalitesi sunmaktadır. Sigfox senkronizasyon problemi sebebiyle veri transferinde frekans atlama yöntemini kullanmaktadır ve mesajların gönderimini iki kez tekrarlayarak servis kalitesini yükseltmeye çalışmaktadır. Sigfox downlink için günlük yalnızca dört mesaja izin vermesi sebebiyle iletimde onaylama mesajları alamamaktadır. Dolayısıyla sensörlerden veri alınması gereken uygulamalar için kullanımı uygunken, aktüatörlerin kontrolü için tercih edilmemektedir [12]. Servis kalitesi büyük önem arz etmeyen uygulamalar için Sigfox ve LoRa tercih edilmektedir.

NB-IoT ve Sigfox'un kapsamına dair Estonya'nın iki üniversitesinde yer alan iki farklı kampüste bazı testler gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde NB-IoT için RSSI, Alınan Referans Sinyali Gücü (Reference Signal Received Power, RSRP), Alınan Referans Sinyali Kalitesi (Reference Signal Received Quality, RSRQ) değerleri hesaplanırken Sigfox için yalnızca RSSI değeri gözlemlenmiştir. Çalışmanın çıktılarında bakıldığında dış mekân ve iç mekân ölçümlerinde hem Sigfox'un hem de NB-IoT'nin umut verici sonuçlar sergilediği gözlemlenmiştir. Buna ek olarak NB-IoT, derin iç mekân söz konusu olduğunda iki kampüste farklı paket kayıp oranlarına sahip olmuştur. Deneysel sonuçlar incelendiğinde derin iç mekânda NB-IoT'nin paket kayıp oranının Sigfox'a göre daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir [9].

3.2 Enerji Verimliliği

LPWAN teknolojilerinin tamamı iyi bir hizmet kalitesi sağlamaya çalışırken diğer taraftan enerji verimliliğini de hesaba katmaktadır. Bu teknolojiler sürekli veri aktarmayan ve hattı dinlemeyen uyku modlarını destekleyerek enerji tüketimini büyük ölçüde düşürmektedir. Teknolojileri birbiriyle kıyasladığımızda, NB-IoT'nin eşzaman iletişim ve yüksek servis kalitesi hizmeti sunabilmek adına

daha çok enerjiye ihtiyaç duymasıyla rakiplerinin gerisinde kaldığı söylenebilir. LoRa uç aygıtlar ve ağ geçidi arasındaki mesafeye göre adaptif veri hızı özelliği sunarak enerji verimliliği sağlarken bu özellik Sigfox ve NB-IoT'de bulunmamaktadır.

3.3 Gecikme

NB-IoT eşzaman iletişim teknolojisiyle düşük gecikme ile iletişim sağlamaktadır. Sigfox ve LoRa gecikmeye daha toleranslıdır. Ancak LoRa bağlantı katmanında önerdiği Sınıf C ile çift yönlü düşük gecikmeli iletişim imkânı sunmakta, bununla birlikte enerji ihtiyacı yönünden A ve B sınıflarına göre daha yüksek enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Uygulama alanında gecikmeye tolerans sağlanacak ise LoRa ve Sigfox; düşük gecikme sağlanmak isteniyor ise NB-IoT tercih edilmektedir.

3.4 Ağ ve kapsama alanı

NB-IoT yüz bin uç aygıtla bağlantıya imkân verirken LoRa ve Sigfox elli bin uç aygıtla hizmet vererek daha az bağlantı imkânı sunmaktadır. LoRa ve Sigfox iletişim maliyetlerini düşüren lisanssız spektrum kullanması sebebiyle veri gecikmelerine neden olmaktadır. Kapsama alanına bakıldığında Sigfox bir baz istasyonu ile kırsalda 30-50 km ve şehirde 3-10 km, LoRa kırsalda maksimum 45 km ve şehirde maksimum 5 km kapsama alanı oluştururken NB-IoT kırsalda maksimum kapsama alanı 10 km şehirde ise 1.5 km menzile sunmaktadır [13]. Sigfox ve NB-IoT'nin aksine LoRa özel ağ kurulabilmesine imkân vermekte ve diğer özel LoRa ağlarıyla uyum sağlayabilmektedir.

Tablo 1. LPWAN teknolojilerinin özelliklerinin karşılaştırılması.

Özellik	LPWAN TEKNOLOJİLERİ		
	LoRa	Sigfox	NB-IoT
Frekans	Lisanssız ISM bandı	Lisanssız ISM bandı	Lisanslı LTE
Frekans Bandı	125, 250, 500 kHz	100, 600 Hz	180 kHz
Modülasyon	CSS, FSK	DBPSK, GFSK	QPSK
İletim Yöntemi	Yarı Çift Yönlü	Çok Sınırlı Yarı Çift Yönlü	Yarı Çift Yönlü
Veri oranı	0.3-37.5 kbps	UL: 100 or 600 bps DL: 600 bps	UL: 64 kbps DL: 25 kbps
Günlük Mesaj Sayısı	Limitsiz	140 Uplink / 4 Downlink	Limitsiz
Kapsama Kırsal	Mak. 45 km	30-50 km	Mak.10 km
Kapsama Şehir	Mak. 5 km	Mak. 3-10 km	Mak 1.5 km
Sinyal Karışmasına Dayanıklılık	Yüksek	Yüksek	Düşük
Şifreleme	AES 128 byte	Yok	LTE şifreleme
Uyarlamalı veri gönderme	Var	Yok	Yok
Konum Belirleme	TDOA	RSSI	Yok
Özel Ağ Kurulumu	Var	Yok	Yok
Standartlaşma	LoRa-Alliance	SigFox, ETSI	3GPP
Gecikme	Düşük (Class C)	Yüksek	Düşük
Maliyet	Düşük	Orta	Orta

3.5 Maliyet

LPWAN teknoloji maliyeti denildiğinde başlıca frekans lisans kullanımı, kurulum maliyetleri ve aygıt maliyetleri akla gelmelidir. Daha önce

bahsedildiği üzere Sigfox ve LoRa ücretsiz spektrum kullanırken NB-IoT lisans masrafları bulunmaktadır. Baz istasyonu maliyeti NB-IOT'de 15-20 bin avro kadarken, Sigfox için 5 bin avro ve LoRa için yalnızca bin avro dolaylarındadır. Ayrıca

LoRA için baz istasyonu kurulumuna gerek olmadan 50-100 avro aralığında 5-10 km kapsama alanı sağlayan ağ geçidi de kullanılabilir. Tablo 1’de LPWAN teknolojileri standartlar, band genişliği, modülasyon, veri oranı, kapsama alanı maliyet, enerji verimliliği, güvenlik ve ağ ve diğer özellikleriyle birlikte özetlenmiş ve karşılaştırılmıştır. Tablo her bir teknolojinin kendine özgü avantaj ve dezavantajlarının belirginleşmesine yardımcı olmaktadır. Elindeki uygulama alanının özelliklerini bilen bir araştırmacı problemin çözümüne yardımcı olacak LPWAN teknolojinin seçiminde ve geleceğin planlamasında ilgili teknolojilerin teknik özelliklerin bilinmesi büyük önem taşımaktadır. Örneğin özel bir LPWAN ağı kurmak istenmesi durumunda buna imkân veren LoRa teknolojisi; yüksek boyutlu ve gecikmesi düşük veri transferi isteniyorsa NB-IoT doğru bir tercih olacaktır.

4 LPWAN uygulama alanları

LPWAN teknolojileri her ne kadar benzer amaçlara hizmet etse de kapsama alanı, veri iletim hızı, iletim kapasitesi, haberleşme yöntemi ve güç tüketimi gibi birçok konuda sunmuş oldukları farklı özellikler sebebiyle uygulama alanlarında farklılaşmalar yaratmaktadır. LPWAN uygulamaları incelendiğinde çalışmalar birden çok uygulama kategorisine ait olabilmektedir. Örneğin, akıllı kavşak yönetimi hem akıllı şehir hem de akıllı ulaşım alanlarında değerlendirilebilmektedir. Bunun yanında akıllı sayaç veya akıllı tarım kategorisi akıllı şehir üst kategorisi içinde düşünülebileceği gibi yaygın kullanımı ve kendine özgü özellikleri sebebiyle çoğunlukla ayrı başlıklar halinde verilmiştir. Bu bölümde LPWAN uygulama alanları, ilgili alanlarda yaygın kullanılan LPWAN teknolojileri ve kullanım gerekçeleri sunulmuştur.

4.1 Akıllı bina ve akıllı şehir

Akıllı ev fikri 1980’lerin başlarında ABD’de ortaya çıkmış ve kullanıcıların performansını artırmak, ilk yatırım, işletme maliyetlerinden tasarruf sağlamak, esnekliği sağlamak ve koordinasyonu yönetmek amaçlarıyla tanımlanmıştır [14]. Akıllı şehirler ise, hayat refah seviyesinin artırılabilmesi için sayısal teknolojilerin aktif bir şekilde yararlanılması temeline dayanan son kullanıcıların da şehir yönetimi ile bütünleştirilmesidir [15]. Akıllı şehir kavramı ortaya çıkarılırken diğer tüm bileşenler gibi haberleşme bileşenleri seçiminde belirli parametrelerin dikkate alınması gerekmektedir. Bunlar; kapsama alanı, güç tüketimi, güvenlik,

yedekleme, uç ürün güvenliği, sunucu güvenliği, ölçeklenebilirlik, birlikte çalışabilirlik, bant genişliği, veri hızı, veri paketi büyüklüğü, regülasyon ve standartlardır[16]. Uygun LPWAN teknolojisi ve parametreler eşleştirilerek bina ve şehirlerimizdeki verilerin toplanması, enerji tüketimi, kaynağa uzaklığı, kapsama alanı gibi etkenler değerlendirildiğinde en uygun teknoloji kullanılır. Akıllı evlerdeki verilen hizmetlere kapı giriş kontrolü, güvenlik sensörü, enerji ölçümü, panik butonu, termostat, ışık, gaz, su kontrolleri örnek verilebilir. Akıllı şehirlerde ise hava kirliliği izleme, veri depolama sistemleri, şehir güvenlikleri, akıllı kartlar gibi uygulamalar verilen hizmetlere örnektir.

Hava kalitesi görüntüleme LoRa[17-20] ve NB-IoT[21-23] iletişim teknolojileri çok yaygın kullanıldığı saptanmıştır. Akıllı cihaz pazarı imalattan sanayiye kadar büyük ilgi görmüş ancak uygun iletişim kanallarının eksikliği şeklinde bir engel varlığını sürdürmektedir. NB-IoT tabanlı IoT, şehir ölçeğinde cihaz ağları sağlar. NB-IoT ağları tarafından kurulan kablosuz kanallar akıllı ağ geçidi üzerinde herhangi özel bir yapılandırma olmaksızın bulut platformuna erişim sağlar. Cihazlar bağlı olduğu sürece bulut platformu verileri otomatik olarak tanır ve geri bildirim sağlar [24]. Özellikle aktuatör aygıtlarının kullanıldığı akıllı ev veya bina uygulamalarında LoRa tercih edilmektedir [25].

LoRa; ekonomik ve sosyal faydalar, altyapı yatırım maliyetinin az olması ve kullanım kolaylığı açısından tercih edilmektedir [26]. Wang ve arkadaşları akıllı şehir özelinde gecikme, veri kapasitesi güç, maliyet, kapsama, ölçeklendirilebilirlik ve güvenlik açısından LP-index metriği geliştirmiş ve deneysel çalışmada LoRa’yı üstün olarak ölçmüştür[27].

4.2 Akıllı sayaç

Kullanım miktarlarının belirlenmesi ve tüketicilere ücret olarak yansıtılabilmesi için, sayaçlardan okunan kullanım bilgisinin belli periyotlarla okunması ve sayısal ortama taşınması gerekmektedir. Geleneksel ve en yaygın yöntem, sayaçların tek tek bir görevli tarafından kontrol edilerek kullanım miktarının ilk ve son endekslerden hesaplanmasıdır. İnsanların şehirlerde toplanması ve endüstriyel üretimin yaygınlaşması nedeni ile abone sayısında radikal bir artış gerçekleşmiş ve geleneksel yöntemler yetersiz kalmıştır [28]. Akıllı sayaçlar, tüketicilere zengin bilgi içeriği sağlayan, çift yönlü haberleşmenin ve

sayaç bilgilerinin elde edilmesinin yanı sıra, ölçme sistemlerine uzaktan erişim sağlanarak doğal afetlerde aniden akışı kesmek gibi gelişmiş teknolojik uygulamalara imkân veren bir ölçüm cihazıdır. Akıllı sayaç tasarımı sayesinde gerçek zamanlı voltaj derecesi dâhil enerji tüketim bilgileri, faz açısı, faz frekansı okunabilir ve güvenli veri aktarımı sağlanabilmektedir. Sistemler, tüketicilerin enerji tüketim verileri düzenli olarak toplayıp tüketim maliyeti hakkında kesin bilgiler vermektedir [29].

İletişim teknolojilerinin kabiliyetlerinin artmasıyla birlikte akıllı sayaçlar, gelişmekte olan teknolojiler arasında yerini almış ve LPWAN teknolojilerinin başarılı uygulandığı en önemli alanlardan birisi olmuştur. Birçok Avrupa ülkesinde kullanımı için araştırma ve geliştirme desteği sunulmaktadır. Akıllı sayaçlarda kullanılan LPWAN teknolojileri açısından uygulama ve araştırmalar incelendiğinde LoRa kullanımının belirgin şekilde üstünlüğü göze çarpmaktadır. Düşük enerjili kablosuz ağların temsilcilerinden biri olan LoRaWAN teknolojisi, akıllı binalarda elektrik şebekesinin izlenmesi, elektrik, ısı ve su sayaçlarının uzaktan okunması için başarıyla uygulanmaktadır. Tankut ve arkadaşları çalışmalarında akıllı su sayaçları için karşılıklı haberleşme için kullanılan LoRa, sayaç okumalarının merkezi bir mesafeden yapılmasını sağlamıştır. LoRa ile su sayaçlarına uzaktan erişim sağlanarak suyu kesmek veya vermek, belirli bir miktar su hakkı yüklemek veya güncellemek, vana üzerindeki parametreleri güncellemek gibi işlemler uzaktan yapılabilmektedir [30]. Mimarisi, bugünlerde en yaygın kullanılan sistemlerle karşılaştırıldığında, örneğin iletilen veri formatını ölçüm veri işleme sisteminin standartlarına göre ayarlayarak sistemin çok daha fazla esnekliğini elde etmeyi sağlar. Sistem çevrim içi uyku modunda çalışabilir ve aynı anda birkaç metreden gelen verileri toplayabilir [31]. Aparicio ve arkadaşları su sayaçlarında da kullanılacak Sigfox-LoRa hibrit ağ mimarisi önermişlerdir. Aygıtlar şehir alanları gibi zor kapsama alanlarındaki uç aygıtlarla haberleşirken LoRa teknolojisinden faydalanmaktadır. Daha sonra veri dönüştürülerek Sigfox ağına gönderilir. Bu sayede iki teknolojinin avantajlı yönleri birlikte kullanılmaktadır [32]. Yine çalışmalar incelendiğinde Yulu Ye ve arkadaşları, Lora temelli su sayaç sistemi önermiştir. Önerilen

sistem yeni bir su sayacı değil mekanik sayaçlara bütünleşmiş bir sistemdir. Sayaç bilgisi düşük güç ve düşük maliyetli bir şekilde bulut sistem üzerinden son kullanıcıya sunulmaktadır [33].

4.3 Akıllı tarım

İklim değişikliği sebebiyle verimsizliğin oluşması ve nüfus artışı sebebiyle ihtiyaçların artması, insanları daha verimli ve güvenli tarım yöntemlerine yönlendirmektedir. Güvenli ve verimli tarım uygulamalarının geliştirilmesinde şüphesiz tarım teknolojileri yadsınamaz bir öneme sahiptir. İklim değişikliğinin getirdiği güvenilmez ve tahmin edilemez durumlar sebebiyle tarım alanlarının akıllı sistemlerle izlenmesi kritik öneme sahiptir. Gelişen teknolojilerle birlikte toprak sıcaklık ve nemi, ortam sıcaklık ve nemi, yağış ve diğer tarımsal ortam verilerinin etkili ve ekonomik şekilde izlenmesi mümkün hale gelmektedir. Bununla birlikte maliyetlerin ve işçi giderlerinin azaltılması adına sulama, ilaçlama ve gübreleme gibi süreçlerin otomatikleştirilmesi ve uzaktan kontrolü de önemli uygulama alanları olarak görülmektedir.

Tarım alanlarındaki ortam verilerinin elde edilmesi ve araçların kontrol edilmesi haberleşme teknolojilerinin kabiliyetlerine bağlıdır. Bu teknolojilerinin yaygınlaşması ise sürdürülebilir ve ekonomik çözümler gerektirmektedir. Tarım arazilerinin büyüklüğü ve enerji kaynaklarına uzaklığı dikkate alındığında tarım uygulamaları geniş kapsama alanına sahip ve düşük enerji tüketimi sağlayan teknolojiler gerektirmektedir. Tarım alanında LPWAN teknolojileri, geniş kapsama alanı bakımından Bluetooth, ZigBee gibi kısa mesafe haberleşme araçları ile enerji tüketimi bakımından 5G gibi hücreli teknolojiler ve WIFI gibi uzun mesafe iletişim teknolojilerine göre açık bir avantaja sahiptir. Literatürdeki başlıca tarım uygulama alanları ve kullanılan LPWAN teknolojileri Tablo 2'deki gibi sınıflandırılabilir.

Tarım alanındaki LPWAN teknolojilerinin uygulama alanları ve özellikleri incelendiğinde, geniş kapsama alanı ve düşük enerji tüketimi dışında kurulum kolaylığı, ekonomiklik, ağ geçici ile düğümler arasında el sıkışma gibi özellikleri sebebiyle LoRa uygulamaları öne çıkmaktadır. Tarım uygulamaları çoğunlukla büyük veri paketleri ve veri hızı gerektirmediğinden LoRa tüm tarım uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Tablo 1. Tarım uygulama alanları ve kullanılan LPWAN teknolojileri.

Amaç	Kullanılan Yöntem
Toprak verilerinin sensörle izlenmesi	LoRa [34-37] NB-IoT [38]
Sulama sistemi	LoRa [34, 39-42], LoRa-Sigfox Hibrit [43]
Sera yönetim sistemi	LoRa [44], NB-IoT [45]
Drone ile tarım sensör verileri elde etme	LoRa [46]
Tarımsal araçların takibi (traktör vb.)	LoRa [47]
Tarımsal su kaynaklarının izlenmesi (miktarı, kalitesi vb.)	LoRa [48]

Sigfox altyapısı bulunmuyorsa veya tarım alanındaki üzerinde kontrol yapılacaksa LoRa tercih sebebi olmaktadır. [49].

4.4 Akıllı ulaşım

Nüfus ve trafikteki motorlu taşıtların sayısındaki artış sebebiyle daha güvenilir ve kolay ulaşım ihtiyacı ortaya çıkmıştır. Bu sebeple güvenli bir seyahat için akıllı ulaşım sistemlerinin geliştirilmesi büyük önem arz etmektedir. Akıllı ulaşım sistemleri kullanılarak akıllı kavşak, akıllı toplu taşıma sistemi, akıllı durak, elektronik denetleme gibi sistemlerin kontrol edilip veri akışı sağlanması mümkün hale gelmektedir. Literatürde verilen istatistik sonuçlarına göre, akıllı ulaşım sistemleriyle trafikte geçirilen zaman %1,9 ile %29,0 oranında, trafikte bekleme süresi %14,8 ile %55,9 oranında kısaltılmakta; beklenmedik durumlara tepki hızı %50 oranında artış göstermekte ve acil durumlara müdahale için gerekli süre %40 düzeyinde kısaltılabilmektedir [50].

Diğer uygulama alanlarına benzer olarak ulaşım alanında da geniş kapsama alanı ve düşük güç tüketimi önemli gereklilikler arasındadır. Dolayısıyla bu imkânları sağlayan LPWAN teknolojileri, yüksek güç tüketimi ihtiyacı olan hücreli iletişim teknolojileri ile Zigbee ve bluetooth gibi kısa mesafe kapsama alanı sunan teknolojilere göre avantajlı bir konumdadır. Enerji tüketimindeki başarısı sebebiyle akıllı park yönetim sistemleri, akıllı kavşak sistemleri, taksit yönetim sistemleri gibi birçok yenilikçi uygulamalar ortaya çıkarmıştır. Uygulamalar incelendiğinde LoRa haberleşmesi ve LoRaWaN ağlarının belirgin olarak öne çıktığı görülmektedir.

Akıllı park sistemleri, IoT aygıtlarının ulaşım sistemlerinde kullanılmasını mümkün kılan önemli kavramlardan birisidir. Uygun park alanlarının bulunması trafik sıkışıklıklarının giderilmesi, gaz

salınımının düşürülmesi ve şehirlerdeki hava kalitesinin artırılmasına katkı sağlamaktadır. Yaygın olarak bilinen bir ürün, Nwave tarafından geliştirilen LoRaWAN uyumlu akıllı park sensör sistemidir. Kent içerisinde 10 km kapsama alanında, 3 ton ağırlığa dayanıklı olarak araçları 12 saniye gibi kısa bir sürede algılayabilmektedir. Uygulamanın en önemli özelliği ise, ürünlerin enerji ihtiyacı duymaksızın 10 yıl kadar ömürlerinin olması ve yapılan çalışmalarda trafik sıkışıklığının %15 ile %30 oranında azaltılması olmuştur. [51]. Geliştirilen birçok uygulama [52-54] LoRa temelli olup Perkoviç ve arkadaşlarının yaptığı deneysel çalışmada [55], LoRa iletişiminin akıllı park sistemlerinde enerji tüketimi açısından NB-IoT ve Sigfox'a göre daha verimli olduğunu ortaya konulmuştur. Trafikğin yönetilmesinde önemli konulardan birisi de trafik ışık ve kavşak yönetimini de içinde barındıran trafik yönetim sistemleridir. Bu uygulama alanında da LoRa teknolojisinin yaygınlığından söz edilmektedir. Seo ve arkadaşları çalışmasında [56] LoRa ve makine öğrenmesi temelli akıllı trafik yönetim sistemi mimarisi önermiştir. Yoğunluk ve seyahat süreleri ile trafik katsayısı üretmekte ve simülasyonlarda %97 başarı elde etmiştir. Divij ve Dikya ise çalışmasında [57] trafik ışık kontrollerini LoRa haberleşme ile acil durum araçları için otomatikleştirmişlerdir.

5 Araştırma Bulguları ve Tartışma

LPWAN teknolojileri ve güncel uygulamaları incelendiğinde teknolojilerin teknik imkânlarının ve performansının geliştirilmesi için yenilikçi çözümler üzerine gidildiği saptanmıştır. Performans geliştirme çalışmaları çoğunlukla aygıt üreticileri, ağ operatörleri ve sistem uzmanları tarafından ucuz donanım tasarımı, güvenilir bağlantı, daha az enerji kullanımı gibi konulara yoğunlaşmıştır.

İnceleme konusu olan LPWAN teknolojilerinin farklı teknik özellikleri sebebiyle uygulama alanlarında farklılaşmaların olduğu söylenebilir. Enerji tüketimini en düşük seviyeye getirmek IoT aygıt ve uygulamalarında kritik öneme sahiptir. Enerji verimliliği açısından Sigfox ve LoRa büyük avantaja sahipken; düşük gecikme, servis kalitesi ve gerçek zamanlı operasyonlar gerekirse NB-IoT daha doğru tercihler olacaktır. Bir LPWAN oluştururken dikkate alınması gereken birçok zorlu faktör bulunmaktaysa da literatür incelendiğinde LoRa kullanımının ve uygulama alanlarının diğer teknolojilere kıyasla daha dinamik olduğu söylenebilir. Özellikle ücretsiz ISM bandı kullanımı, aygıtların ucuzluğu, ağ kurulumu maliyetlerinin az oluşu ve teknik özellikleri sayesinde kendisine esnek uygulama alanı sağlamıştır. LoRa ağlarının yaygınlığının yanında fiziksel katmanından kaynaklı kısıtlılıklarından da söz etmek gerekir. LoRa'nın önemli sorunlarından birisi ağ ölçeklenebilirliğidir. Maliyet analizleri aygıt yoğunluğu az olduğu senaryolarda LoRaWAN'ın maliyet verimli olduğunu göstermektedir. Şehirlerde aygıt yoğunluğunun yüksek olduğu alanlar da ise NB-IoT maliyet verimlidir.

6 Sonuç

Bu çalışmada öncü LPWAN teknolojileri olan LoRa, Sigfox ve NB-IoT teknik açıdan incelenmiş ve özetlenmiştir. LPWAN teknolojilerinin birbirlerine göre avantajlı ve dezavantajlı yönleri uygulama alanlarını ve pazarlarını farklılaştırıldığı vurgulanmıştır. Servis kalitesi ve gecikmenin kritik olduğu uygulamalar için NB-IoT diğer teknolojilere göre önce çıkarken, aygıt maliyeti, geniş kapsama alanı ve daha verimli enerji kullanımı konusunda LoRa ve Sigfox öne çıkmıştır. Ağ geçidi ve uç aygıtların karşılıklı haberleşmesi ve aktuatörlere komut gönderilmesi gerektiğinde ise LoRa, Sigfox'un önüne geçmektedir. Teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte akıllı şehirler, akıllı tarım, akıllı lojistik gibi birçok alanda yaygın uygulamaların görüleceği düşünülmektedir.

Kaynaklar

- [1] Asghari, P., Rahmani, A. M., and Javadi, H. H. S. J. C. N., "Internet of Things applications: A systematic review," *Computer Networks* vol. 148, 241-261, 2019.
- [2] Pourghebleh, B. and Hayyolalam, V. J. C. C., "A comprehensive and systematic review of the load balancing mechanisms in the Internet of Things," *Cluster Computing*, vol. 23, no. 2, 641-661, 2020.
- [3] Pourghebleh, B., Navimipour, N. J. J. o. N., and Applications, C., "Data aggregation mechanisms in the Internet of things: A systematic review of the literature and recommendations for future research," *Journal of Network and Computer Applications* vol. 97, 23-34, 2017.
- [4] Oyucu, S. and Polat, H., "M2M ve IoT platformları üzerinde prototip uygulama geliştirme," *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi*, vol. 9, no. 2, 11-20, 2017.
- [5] Patel, D. and Won, M., "Experimental study on low power wide area networks (LPWAN) for mobile Internet of Things," in *2017 IEEE 85th vehicular technology conference (VTC Spring)*: IEEE, 1-5, 2017.
- [6] Qadir, Q. M., Rashid, T. A., Al-Salihi, N. K., Ismael, B., Kist, A. A., and Zhang, Z. J. I. A., "Low power wide area networks: A survey of enabling technologies, applications and interoperability needs," *IEEE Access*, vol. 6, 77454-77473, 2018.
- [7] Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., and Meyer, F. J. I. e., "A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment," *ICT express*, vol. 5, no. 1, 1-7, 2019.
- [8] Lalle, Y., Fourati, L. C., Fourati, M., and Barraca, J. P., "A comparative study of LoRaWAN, SigFox, and NB-IoT for smart water grid," in *2019 Global Information Infrastructure and Networking Symposium (GIIS)*, IEEE, 1-6, 2019.
- [9] Loh, F., Mehling, N., and Hoßfeld, T. J. S., "Towards LoRaWAN without Data Loss: Studying the Performance of Different Channel Access Approaches," *Sensors*, vol. 22, no. 2, p. 691, 2022.
- [10] Workgroup, T. J. n. N., "A technical overview of LoRa and LoRaWAN," 2015.
- [11] Chen, M., Miao, Y., Hao, Y., and Hwang, K., "Narrow band internet of things," *IEEE access*, vol. 5, 20557-20577, 2017.
- [12] Tournier, J., Lesueur, F., Le Mouël, F., Guyon, L., and Ben-Hassine, H., "A survey of IoT protocols and their security issues through the lens of a generic IoT stack," *Internet of Things*, vol. 16, p. 100264, 2021.
- [13] Augustin, A., Yi, J., Clausen, T., and Townsley, W. M. J. S., "A study of LoRa: Long range & low power networks for the internet of things," *Sensors*, vol. 16, no. 9, p. 1466, 2016.
- [14] İsa, A., "Akıllı Evlerde IoT Teknolojileri ve Siber Güvenlik," *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, no. 34, 226-233, 2022.
- [15] Pehlivan, E., "Katılımcı, Sürdürülebilir Bir Akıllı Şehir Hedefliyoruz," *Fortune Dergisi*, 2017.
- [16] Shahjalal, M., Hasan, M. K., Islam, M. M., Alam, M. M., Ahmed, M. F., and Jang, Y. M., "An overview of AI-enabled remote smart-home monitoring system using LoRa," in *2020 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIIC)*, IEEE, 510-513, 2020.
- [17] Liu, S., Xia, C., and Zhao, Z., "A low-power real-time air quality monitoring system using LPWAN based

- on LoRa," in *2016 13th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT)*, IEEE, 379-381, 2016.
- [18] Raghuvvera, E., Kanakaraja, P., Kishore, K. H., Sriya, C. T., and Lalith, B. S. K. T., "An IoT Enabled Air Quality Monitoring System Using LoRa and LPWAN," in *2021 5th International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*, IEEE, 453-459, 2021.
- [19] Udomlumlert, A., Vichaidis, N., Kamin, P., Surasak, T., Huang, S. C.-H., and Jiteurtragool, N., "The Development of Air Quality Monitoring System using IoT and LPWAN," in *2020-5th International Conference on Information Technology (InCIT)*, IEEE, 254-258, 2020.
- [20] Twahirwa, E., Mtonga, K., Ngabo, D., and Kumaran, S., "A LoRa enabled IoT-based Air Quality Monitoring System for Smart City," in *2021 IEEE World AI IoT Congress (AIoT)*, IEEE, 0379-0385, 2021.
- [21] Duangsuwan, S., Takarn, A., and Jamjareegulgarn, P., "A development on air pollution detection sensors based on NB-IoT network for smart cities," in *2018 18th International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT)*, IEEE, 313-317, 2018.
- [22] Cheng, Y., Xu, X., Du, Y., Guan, P., Liu, S., and Zhao, L., "Design of air quality monitoring system based on NB-IoT," in *2019 IEEE International conference on power, intelligent computing and systems (ICPICS)*, IEEE, 385-388, 2019.
- [23] Duangsuwan, S., Takarn, A., Nujankaew, R., and Jamjareegulgarn, P., "A study of air pollution smart sensors lpwan via nb-iot for thailand smart cities 4.0," in *2018 10th International conference on knowledge and smart technology (KST)*, IEEE, 206-209, 2018.
- [24] Song, Y., Lin, J., Tang, M., and Dong, S., "An Internet of energy things based on wireless LPWAN," *Engineering*, vol. 3, no. 4, 460-466, 2017.
- [25] Kim, K. *et al.*, "Feasibility of LoRa for smart home indoor localization," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 1, p. 415, 2021.
- [26] Queralta, J. P., Gia, T. N., Zou, Z., Tenhunen, H., and Westerlund, T., "Comparative study of LPWAN technologies on unlicensed bands for M2M communication in the IoT: Beyond LoRa and LoRaWAN," *Procedia Computer Science*, vol. 155, 343-350, 2019.
- [27] Wang, H. *et al.*, "LP-INDEX: Explore the best practice of LPWAN technologies in smart city," in *2020 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)*, IEEE, 1-5, 2020.
- [28] Domene, E. and Saurí, D., "Urbanisation and water consumption: Influencing factors in the metropolitan region of Barcelona," *Urban Studies*, vol. 43, no. 9, 1605-1623, 2006.
- [29] Atiç, S., Parlakyıldız, Ş., and İlcihan, Z., "Smart Meter and Turkey," *Bitlis Eren University Journal of Science and Technology*, vol. 5, no. 2, 92-96, 2015.
- [30] Tankut, E., Çelikkaya, B., Yurdakoç, E., Sisalan, V., and Catak, M., "Akıllı Su Sayaçlarında Çift Yönlü LoRaWAN Protokolü ve IoT Uygulaması," *Journal of Intelligent Systems: Theory and Applications*, vol. 2, no. 3, 32-36, 2019.
- [31] Nowak, M., Derbis, P., Kurowski, K., Rózycki, R., and Waligóra, G., "LPWAN Networks for Energy Meters Reading and Monitoring Power Supply Network in Intelligent Buildings," *Energies*, vol. 14, no. 23, p. 7924, 2021.
- [32] Rubio-Aparicio, J., Cerdan-Cartagena, F., Suardiaz-Muro, J., and Ybarra-Moreno, J., "Design and implementation of a mixed IoT LPWAN network architecture," *Sensors*, vol. 19, no. 3, p. 675, 2019.
- [33] Ye, Y., Yang, Y., Zhu, L., Wang, J., and Rao, D., "A lora-based low-power smart water metering system," in *2021 IEEE International Conference on Consumer Electronics and Computer Engineering (ICCECE)*: IEEE, 301-305, 2021.
- [34] Khoa, T. A., Man, M. M., Nguyen, T.-Y., Nguyen, V., and Nam, N. H., "Smart agriculture using IoT multi-sensors: a novel watering management system," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 8, no. 3, p. 45, 2019.
- [35] Ramson, S. J. *et al.*, "A self-powered, real-time, LoRaWAN IoT-based soil health monitoring system," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 11, 9278-9293, 2021.
- [36] Das, S., Verma, S., Kaushik, T., and Gupta, N., "LoRaWAN IoT based Precision Smart Farming Architecture with Data Visualization," in *2022 International Conference for Advancement in Technology (ICONAT)*, IEEE, 1-6, 2022.
- [37] Singh, D. K., Sobti, R., Jain, A., Malik, P. K., and Le, D. N., "LoRa based intelligent soil and weather condition monitoring with internet of things for precision agriculture in smart cities," *IET Communications*, vol. 16, no. 5, 604-618, 2022.
- [38] Castellanos, G., Deruyck, M., Martens, L., and Joseph, W., "System assessment of WUSN using NB-IoT UAV-aided networks in potato crops," *IEEE Access*, vol. 8, 56823-56836, 2020.
- [39] Froiz-Míguez, I. *et al.*, "Design, implementation, and empirical validation of an IoT smart irrigation system for fog computing applications based on Lora and Lorawan sensor nodes," *Sensors*, vol. 20, no. 23, p. 6865, 2020.
- [40] Sánchez-Sutil, F. and Cano-Ortega, A., "Smart Control and Energy Efficiency in Irrigation Systems Using LoRaWAN," *Sensors*, vol. 21, no. 21, p. 7041, 2021.
- [41] Chang, Y.-C., Huang, T.-W., and Huang, N.-F., "A machine learning based smart irrigation system with lora p2p networks," in *2019 20th Asia-Pacific*

- Network Operations and Management Symposium (APNOMS)*, IEEE, 1-4, 2019.
- [42] Zhang, J.-C., Khieng, D. H. T., and Huang, N.-F., "A Long Range Reliable Precise Irrigation System Based on LoRaP2P Protocol," in *2022 International Conference on Information Networking (ICOIN)*, IEEE, 107-112, 2022.
- [43] Fernández-Ahumada, L. M., Ramírez-Faz, J., Torres-Romero, M., and López-Luque, R., "Proposal for the design of monitoring and operating irrigation networks based on IoT, cloud computing and free hardware technologies," *Sensors*, vol. 19, no. 10, p. 2318, 2019.
- [44] Al Fajar, M. C. and Samijayani, O. N., "Realtime greenhouse environment monitoring based on LoRaWAN Protocol using grafana," in *2021 International Symposium on Electronics and Smart Devices (ISESD)*, IEEE, 1-5, 2021.
- [45] Zhang, F., Wan, X., Zheng, T., Cui, J., Li, X., and Yang, Y., "Smart greenhouse management system based on NB-IoT and smartphone," in *2020 17th International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE)*, IEEE, 36-41, 2020.
- [46] Caruso, A., Chessa, S., Escolar, S., Barba, J., and López, J. C., "Collection of data with drones in precision agriculture: Analytical model and LoRa case study," *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 8, no. 22, 16692-16704, 2021.
- [47] CIVELEK, Ç., "Development of an IoT based (LoRaWAN) Tractor Tracking System," *Journal of Agricultural Sciences*, DOI: 10.15832/ankutbd.769200, 21-21 2022 .
- [48] Abeidi, H. A., Kerim, B., and Nanne, M. F., "A Study for Remote Monitoring of Water Points in Mauritania Based on IoT (LoRa) Technology," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics (IJEI)*, vol. 10, no. 2, 398-409, 2022.
- [49] Kuo, Y.-W., Wen, W.-L., Hu, X.-F., Shen, Y.-T., and Miao, S.-Y. J. P., "A lora-based multisensor IoT platform for agriculture monitoring and submersible pump control in a water bamboo field," vol. 9, no. 5, p. 813, 2021.
- [50] Singh, B. and Gupta, A., "Recent trends in intelligent transportation systems: a review," *Journal of Transport Literature*, vol. 9, 30-34, 2015.
- [51] Pham, T. L., Nguyen, H., Nguyen, H., Bui, V., and Jang, Y. M., "Low power wide area network technologies for smart cities applications," in *2019 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, IEEE, 501-505, 2019.
- [52] Kodali, R. K., Borra, K. Y., GN, S. S., and Domma, H. J., "An IoT based smart parking system using LoRa," in *2018 International conference on cyber-enabled distributed computing and knowledge discovery (CyberC)*, IEEE, 151-1513, 2018.
- [53] Sarker, V. K., Gia, T. N., Ben Dhaou, I., and Westerlund, T., "Smart parking system with dynamic pricing, edge-cloud computing and lora," *Sensors*, vol. 20, no. 17, p. 4669, 2020.
- [54] Angelov, K. K., "Development and Implementation of a Demonstration Model of Smart Parking with LoRa-Based Communication Module," in *2020 XI National Conference with International Participation (ELECTRONICA)* IEEE, 1-4, 2020.
- [55] Perković, T., Šolić, P., Zargariasl, H., Čoko, D., and Rodrigues, J. J., "Smart parking sensors: state of the art and performance evaluation," *Journal of Cleaner Production*, vol. 262, p. 121181, 2020.
- [56] Seo, S. B., Yadav, P., and Singh, D., "LoRa based architecture for smart town traffic management system," *Multimedia Tools and Applications*, 1-16, 2020.
- [57] Divij, N., Divya, K., and Badage, A., "IoT based Automated Traffic Light Control System for Emergency Vehicles using LoRa", 2019.