Bu çalışma, **Akıllı Şehirlerde LoRaWAN Kullanımı ve Uygulamaları** üzerine kapsamlı bir genel bakış sunmaktadır. LoRaWAN'ın **uzun menzil, düşük güç tüketimi ve maliyet etkinliği** gibi temel özelliklerini açıklarken, **akıllı sokak aydınlatması, su ve atık yönetimi, çevresel izleme** gibi çeşitli uygulama alanlarına değinilir. Ayrıca, **performans değerlendirmeleri, yönlendirme stratejileri, emülasyon ve maliyet analizleri** gibi teknik detaylar incelenmiş ve **güvenlik açıkları, düşük veri hızı ve görev döngüsü sınırlamaları** gibi karşılaşılan zorluklar belirtilmiştir. Belgeler, LoRaWAN'ın **"yıldızın yıldızı" topolojisi, cihaz sınıfları (A, B, C) ve aktivasyon mekanizmaları (ABP, OTAA)** gibi temel kavramlarını da içermektedir.

Bu makaleyi Spotify'da sesli olarak dinlemek için podcast'ine bu linkten ulaşabilirsiniz.

Akıllı şehirlerde LoRaWAN (Uzun Menzilli Geniş Alan Ağı) kullanımı, Bilgi ve İletişim Teknolojilerinin (BİT) kentsel ortamları daha yaşanabilir, verimli ve sürdürülebilir hale getirme hedefine ulaşmasında kritik bir rol oynamaktadır. LoRaWAN, Nesnelerin İnterneti (IoT) uygulamaları için uzun menzilli bağlantı, düşük güç tüketimi ve uygun maliyetli dağıtım imkanı sunarak öne çıkan bir teknolojidir.

Bu makaleyi Youtube'da görüntülü olarak izlemek için videosuna bu linkten ulaşabilirsiniz.

1.1 LoRaWAN'ın Akıllı Şehirler İçin Önemi ve Genel Bakış

Akıllı şehirler, IoT tabanlı girişimlerle kentsel hizmetlerin veriye dayalı optimizasyonunu hedefler. LoRaWAN, hızlı kentleşmeyle birlikte artan nüfus ve IoT cihazı sayısıyla başa çıkma yeteneği sayesinde akıllı şehir altyapılarının önemli bir bileşenidir. Geleneksel hücresel ağlar, büyük ölçekli düşük güçlü cihazlara hizmet vermek için tasarlanmadığından, LoRaWAN gibi LPWAN (Düşük Güçlü Geniş Alan Ağı) teknolojilerinin önemi artmaktadır. LoRaWAN, özel ağların kurulmasına izin vermesi, hizmet sağlayıcılara olan bağımlılığı azaltması ve ekipman maliyetlerinin düşük olması gibi avantajlarıyla dünya genelinde birçok pilot akıllı şehir projesinde popülerlik kazanmıştır.

1.2 LoRaWAN'ın Temel Özellikleri

LoRaWAN, akıllı şehir uygulamaları için ideal kılan birçok temel özelliğe sahiptir:

- **Modülasyon ve Fiziksel Katman:** Semtech tarafından geliştirilen tescilli LoRa radyolarını kullanır ve gelişmiş Chirp Yayılma Spektrumu (CSS) modülasyonunu uygular. Bu modülasyon, düşük güç özelliklerini korurken iletişim menzilini önemli ölçüde artırır. Yayılma Faktörü (SF), Bant Genişliği (BW) ve Kodlama Oranı (CR) gibi parametreler menzil, veri hızı ve güvenilirlik arasında denge sağlar.
- **Frekans Aralığı:** Lisanssız alt-GHz bantlarında çalışır; Avrupa'da 868 MHz ve 433

MHz, ABD'de 915 MHz, Asya'da ise 433 MHz veya 919-923 MHz gibi bölgesel farklılıklar mevcuttur.
- **Menzil:** Kentsel alanlarda 2-8 km, kırsal alanlarda 15-20 km gibi uzun iletişim menzilleri sunar. Görüş hattında 10 km'ye, engelsiz alanlarda ise 40 km'ye kadar çıkabilir. Ancak, binalar, ağaçlar veya yeraltı kurulumları gibi engeller sinyal zayıflamasına neden olabilir.
- **Veri Hızı (Throughput):** Veri hızları, yayılma faktörüne (SF) bağlı olarak 0,3 kbps'den 50 kbps'ye kadar değişir. Düşük veri hızına sahip olması, gerçek zamanlı ve yüksek veri akışlı uygulamalar için uygun olmadığı anlamına gelir.
- **Güç Tüketimi:** Düşük güç tüketimi için tasarlanmıştır, pille çalışan cihazların yıllarca çalışmasına olanak tanır. Cihazların çoğu zaman güç tasarrufu modunda kalmasıyla güç optimize edilebilir.
- **Ağ Topolojisi:** Uç cihazların tek bir atlamayla bir veya birden fazla ağ geçidine bağlandığı bir "yıldız-ağaç" topolojisi kullanır. Ağ geçitleri mesajları bir Ağ Sunucusu'na (NS) iletir.
- **Güvenlik:** Ağ ve uygulama seviyelerinde AES-128 şifrelemesiyle uçtan uca güvenli iletişim sağlar. Sürüm 1.1'de dolaşım ve daha güçlü güvenlik özellikleri sunulmuştur.
- **Adaptif Veri Hızı (ADR):** Bağlantı kalitesine bağlı olarak veri hızlarını, hava süresini ve enerji tüketimini optimize eder. Bu özellik, cihaz hareketsiz olduğunda özellikle faydalıdır.
- **Cihaz Sınıfları:** Üç farklı çalışma moduna sahip uç cihazlar tanımlar: Sınıf A (en düşük güç tüketimli, zorunlu), Sınıf B (zamanlanmış alım pencereleri) ve Sınıf C (sürekli dinleme, en yüksek güç tüketimi).
- **Ölçeklenebilirlik:** Binlerce sensör ve cihazın geniş bir ağ üzerinde bağlanması için tasarlanmıştır; tek bir ağ geçidi binlerce düğümü aynı anda destekleyebilir.
- **Çift Yönlü İletişim:** Uç cihazlar ile ağ geçidi arasında çift yönlü iletişim sağlar, veri toplamanın yanı sıra cihazlara komut gönderme yeteneği de sunar.
- **Girişime Karşı Direnç:** CSS modülasyonu sayesinde girişime karşı yüksek bağışıklığa sahiptir.
- **Konum Belirleme Yeteneği:** Dahili GPS'e ihtiyaç duymadan trilaterasyon ilkesiyle cihazların konumunu belirleyebilir (RSSI ve TDOA tabanlı), bu da pil tüketimini minimumda tutar.
- **Açık Standart ve Topluluk:** LoRa Alliance tarafından yönetilen açık bir standarttır ve The Things Network (TTN) gibi büyük bir geliştirici topluluğuna sahiptir.

1.3 Akıllı Şehir Uygulamalarında LoRaWAN Kullanımı

LoRaWAN, akıllı şehirlerde geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir. Sertifikalı LoRaWAN ürünlerinin çoğu (177 cihazdan 127'si) akıllı şehir çözümleri için doğrudan veya dolaylı olarak kullanılabilir. Başlıca uygulama alanları ve örnekleri şunlardır:

- **Akıllı Sokak Aydınlatması:** Enerji kullanımını ve karbon ayak izini azaltmak için trafik koşullarına göre sokak lambalarını kısma veya açma/kapama. Malezya'daki

Selangor Cyber Valley'de ve Avustralya'daki Perth'te LoRaWAN tabanlı akıllı sokak lambası kontrolörleri dağıtılmıştır.

- **Akıllı Su Yönetimi:** Gerçek zamanlı izleme ve su kaynaklarının verimli kullanımı. Kıbrıs'ın Pafos kentinde 30.000'den fazla akıllı su sayacı içeren büyük ölçekli bir LoRaWAN ağı çalışmaktadır. Bu sayaçlar su sızıntısını veya geri akışı algılayan sensörlere sahiptir.
- **Akıllı Atık Yönetimi:** Çöp toplamanın verimliliğini artırmak ve çevresel yükü azaltmak için atık bidonlarının doluluk oranını izleme. İsveç'in Södertälje ve Slovakya'nın Nitra şehirlerinde bu tür sistemler uygulanmıştır.
- **Çevresel İzleme:** Hava kalitesi (sıcaklık, nem, toz, karbon dioksit, PM2.5, PM10), gürültü ve hava durumu (rüzgar hızı ve yönü, sıcaklık, nem, yağış) gibi parametreleri izleme. İngiltere'nin Southampton kentinde ve Myanmar'ın Yangon şehrinde LoRaWAN tabanlı hava kalitesi izleme cihazları dağıtılmıştır. Amsterdam Schiphol Havaalanı'nda da sensör ağları kullanılmaktadır.
- **Akıllı Park Sistemleri:** Park yerlerinin doluluk oranını izleme. Çek Cumhuriyeti'nin Kladno kentinde pilot projeler yürütülmektedir.
- **Akıllı Ulaşım Sistemleri (ITS):** Trafiği izleme, araç konum takibi ve araçlar arası iletişim. LoRaWAN, 3G/4G bağlantısının yetersiz kaldığı durumlarda yedek kanal olarak kullanılabilir. İtalya'nın Brescia kentinde filo yönetimi, Brezilya'nın Natal kentinde ise 4G bağlantısı yedeklemesi için testler yapılmıştır.
- **Bina ve Tesis Güvenliği:** Kapı ve pencerelerin açılmasını/kapanmasını izlemek için manyetik kontak sensörleri ve rögar kapaklarının durumunu izlemek için ivmeölçerler.
- **Tüketim Okuma Sistemleri:** Elektrik ve gaz tüketimini izleme (akıllı sayaçlar aracılığıyla).
- **Varlık Takibi:** İnsanları, hayvanları veya nesneleri takip etme.
- **Akıllı Kampüsler:** Tesis doluluğu tespiti, oda katılımı ve verimli park etme gibi hizmetler sunar. Brescia ve Saint Joseph Üniversiteleri kampüslerinde değerlendirmeler yapılmıştır.

1.4 Performans Değerlendirmesi

LoRaWAN performans değerlendirmeleri hem laboratuvar ortamında hem de gerçek dünya dağıtımlarında yapılmıştır.

- **Paket Hata Oranları (PER) ve Teslim Oranı (PDR):** Selangor Cyber Valley'deki LoRaWAN akıllı sokak lambası sistemi düşük paket hata oranları (yaklaşık %1) ve 3 saniyeden kısa komut yanıt süresi göstermiştir. Güney Danimarka Üniversitesi kampüsünde 1000 paket testinde %95 PDR elde edilmiştir. Yağmurun LoRaWAN iletim kalitesini ciddi şekilde etkilemediği gözlemlenmiştir.
- **Sinyal Gücü (RSSI ve ESP):** Kıbrıs'ın Pafos kentindeki büyük ölçekli bir LoRaWAN dağıtımında, makine öğrenimi modelleri (Karar Ağaçları ve XGBoost) Tahmini Sinyal Gücü'nü (ESP) tahmin etmek için kullanılmış ve yüksek doğruluk sağlamıştır. Çevre koşullarının (sıcaklık, yağış, çiğ noktası, bağıl nem) paket alım başarısını etkilediğine dair belirli bir örüntü gözlemlenmemiştir.

- **Menzil ve Kapsam:** İspanya'nın Murcia kentinde yapılan bir teorik çalışmada, orta büyüklükte bir şehrin beş ağ geçidiyle kapsanabileceği gösterilmiştir. Rusya'nın St. Petersburg kentinde şehir merkezinde 1500 m, kozalaklı ormanla çevrili kenar mahallede ise 1050 m LoRaWAN ağ geçidi kapsama alanı ölçülmüştür.
- **Gecikme (Latency):** Sistem, gerçek dünya koşullarında 3 saniyeden daha kısa komut yanıt süresi göstermiştir. Gecikmelerin 400 ms ile birkaç saniye arasında değiştiği gözlemlenmiştir; arka uç sunucu yükünün gecikmeleri artırabileceği belirtilmiştir.

1.5 Zorluklar ve Sınırlamalar

LoRaWAN'ın akıllı şehir uygulamalarında bazı zorlukları ve sınırlamaları bulunmaktadır:

- **Düşük Veri Hızı ve Gecikme:** Yüksek bant genişliği gerektiren veya gerçek zamanlı iletişim ihtiyacı olan uygulamalar için uygun değildir. Yoğun ağlarda gecikmeler birkaç saniyeyi bulabilir.
- **Görev Döngüsü Sınırlamaları:** Avrupa'da uç cihazlar için %1, ağ geçitleri için %10 gibi katı görev döngüsü sınırlamaları bulunmaktadır, bu da kanalın kullanım süresini sınırlar.
- **Çevresel Faktörlerin Etkisi:** Binalar, ağaçlar veya yeraltı kurulumları gibi engeller sinyal zayıflamasına neden olabilir.
- **Mobilite Etkisi:** Yüksek hızlı mobilite senaryolarında paket teslim oranında (PDR) belirgin bir düşüş gözlemlenmiştir.
- **Güvenlik Açıkları:** Yerleşik güvenlik özelliklerine rağmen, karıştırma (jamming) saldırıları gibi fiziksel katman saldırıları iletişimi ciddi şekilde etkileyebilir ve paket kaybına yol açabilir.
- **Ağ Geçidi Yükü ve Gecikme:** Yoğun ağlarda veya arka uç sistemlerdeki tıkanıklıklar gecikmelere neden olabilir.
- **Standartlaşma ve Uluslararası Hareketlilik:** Lisanssız frekans bantlarının bölgesel farklılıkları, cihazların uluslararası taşınmasında ek zorluklar yaratır.
- **Çok Atlamalı İletişim Zorlukları:** Uzun menzilli bağlantılar engeller veya parazit nedeniyle paket kayıpları yaşayabilir, bu da çok atlamalı iletişime duyulan ihtiyacı ortaya çıkarır. Ancak, düşük veri hızları uçtan uca gecikmeyi artırabilir. Enerji tüketimi de yönlendirme düğümlerinin sürekli aktif kalmasıyla artabilir.

1.6 Emülasyon ve Maliyet

LoRaWAN ağlarının planlanması ve optimizasyonu, gerçek dağıtımlardan önce sistem performansının değerlendirilmesi için emülasyon ve simülasyon araçlarının kullanılmasını içerir.

- **Emülasyon Platformları:** Konteyner tabanlı hafif sanallaştırma (LV) tekniklerini kullanan uçtan uca LoRaWAN emülasyon çözümleri geliştirilmiştir. Bu yaklaşım, düğüm ve arka uç işlevlerinin parçalanmasına ve ayrıştırılmasına olanak tanır, bu da daha gerçekçi senaryoları simüle etmeye yardımcı olur.

- **Maliyet Değerlendirmesi:** LoRaWAN dağıtımlarının maliyet etkinliği ve yatırım getirisi ekonomik analizlerle değerlendirilmiştir. Büyük ölçekli bir ağ dağıtımının toplam maliyetini belirlemek için donanım, yazılım, işçilik ve saha kirası gibi çeşitli faktörler göz önünde bulundurulur. Örneğin, Büyük Londra bölgesinde bir hava izleme ağı için ana harcama kaleminin altyapı kirası olduğu tahmin edilmiştir (yılda yaklaşık 1.1 milyon £). Tek bir uç cihazın maliyetinin perakende fiyatının yaklaşık %25'i olduğu ve tüm tasarlanmış ağ için toplam cihaz maliyetinin yaklaşık 83.7 bin £ olduğu tahmin edilmiştir. Konteyner tabanlı emülasyon, yüzlerce düğüme sahip tam bir LoRaWAN mimarisinin bir saatlik emülasyonunun bulut tabanlı bir bilgi işlem platformunda 1 USD'den daha az maliyete mal olmasıyla nispeten uygun maliyetli olabilir.

1.7 Gelecek Çalışmalar ve Gelişmeler

LoRaWAN teknolojisinin akıllı şehir uygulamalarındaki potansiyelini daha da artırmak için çeşitli alanlarda çalışmalar devam etmektedir:

- **Güvenilirlik ve Bakım:** Cihazların Ortalama Arıza Arası Süresi (MTBF) ve Ortalama Bakım Arası Süresi (MTBM) gibi metriklerin ampirik olarak kanıtlanması.
- **Trafik Yönetimi Entegrasyonu:** Trafik yönetimi ve akıllı öğelerin bakım hizmeti gereksinimlerinin tahmini için CCTV entegrasyonu.
- **Konum Belirleme Gelişmeleri:** GPS için geliştirilmiş çapa konum tahmini ve iç ve dış mekan konum verileri mevcut olduğunda veri füzyon algoritmaları kullanılması.
- **5G Entegrasyonu:** LPWAN'ların omurgası olarak 5G çözümleriyle tamamlanması.
- **Blockchain Uygulamaları:** LoRaWAN ağ sunucuları için Blockchain tabanlı çözümler, güvenilir ve kurcalamaya dayanıklı sistemler sağlamak için araştırılmaktadır.
- **Makine Öğrenimi Kullanımı:** Ağ performansını optimize etmek ve sinyal yayılımını tahmin etmek için Karar Ağaçları ve XGBoost gibi regresyon tabanlı makine öğrenimi modellerinin kullanılması.
- **Ağ Geçidi Konumlandırma Optimizasyonu:** Kapsama alanını iyileştirmek için ağ geçitlerinin yerleşiminin optimize edilmesi.
- **Çoklu Hop İletişimi:** LoRaWAN'ın tek hop topolojisinin sınırlamalarını aşmak için yönlendirme şemalarıyla çoklu hop iletişimi geliştirme. Ağaç Topolojisi (LoRa Mesh, RPL, DSDV) ve Sel (Flooding) tabanlı (CT-LoRa, LoRaBlink) yaklaşımlar incelenmektedir.
- **Enerji Tasarrufu Mekanizmaları:** Çoklu hop şemalarında enerji tüketimini azaltmak için uyku modları ve ebeveyn rotasyonu gibi mekanizmalar.

Özetle, LoRaWAN, düşük güç tüketimi, uzun menzil ve uygun maliyetli dağıtım gibi temel özellikleriyle akıllı şehirlerde enerji izleme, akıllı atık yönetimi, trafik izleme, akıllı otopark, çevre izleme ve kamu altyapısının bakımı gibi geniş bir uygulama yelpazesi sunmaktadır. Performans değerlendirmeleri teknolojinin güvenilirliğini ve uygulanabilirliğini göstermekle birlikte, çok atlamalı yönlendirme ve güvenlik gibi alanlarda daha fazla araştırmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Emülasyon ve maliyet analizleri, LoRaWAN'ın akıllı şehir altyapılarında gelecekteki dağıtımları için değerli bir rehber sağlamaktadır.