

Bir Bina İçi LoRaWAN Ağında SNR ile RSSI İlişkisinin MATLAB Eğri Uydurma Yöntemi Yardımıyla Regresyon Analizi

Ömer YILDIZ^{1*} , Sait Eser KARLIK² 

Öz

Günümüzde şehirler hızla büyümektedir. Artan nüfus, kent merkezlerindeki kaynakların daha verimli kullanılması gerekliliğini ortaya çıkarırken; bu durum akıllı şehir ve nesnelerin interneti kavramlarını beraberinde getirmiştir. Yaşam alanlarında düşük maliyetli, kablolu ve uzaktan veri alışverişi ile kaynak yönetimi, takibi, performans analizi ve optimizasyonu yapmaya imkân sağlayan nesnelerin interneti uygulamaları, LoRaWAN'ı karşımıza çıkarmaktadır. LoRaWAN teknolojisi, uzak mesafe iletişimde düşük altyapı maliyeti, düşük pil tüketimi, kolay kurulum ve genişleyebilir ağ yapısı özelliği sayesinde yaygınlaşmıştır. LoRaWAN ağ planlamasında, RSSI, SNR ve SF değerleri ağ verimliliği için önem arz eder. Bu çalışmada, bir bina içi LoRaWAN ağından elde edilen veriler ve MATLAB eğri uydurma yöntemi kullanılarak SNR ile RSSI ilişkisinin analizi gerçekleştirilmiştir. Eğri uydurmada, polinom, Fourier ve Gauss regresyon modelleri incelenmiştir. Uyum iyiliği parametreleri açısından, ağ verilerine en yüksek uyumu sağlayan eğrinin denkleminin 9. dereceden bir polinom ile ifade edilebildiği gözlenmiştir. SF parametresinin SF7 değerinde sabit olduğu durumda, SNR ile RSSI arasındaki ilişkiyi tanımlamak için ağ verilerine uydurulan eğrilerin uyum iyiliği karşılaştırması yapıldığında; R^2 değeri, polinom regresyon modeli kullanıldığında 0.9362, Fourier regresyon modeli kullanıldığında 0.8459, Gauss regresyon modeli kullanıldığında ise 0.8572 olarak belirlenmiştir. RMSE değerleri ise, polinom regresyon modelinde 0.2440, Fourier regresyon modelinde 0.3895 ve Gauss regresyon modelinde 0.3828 olarak bulunmuştur.

Anahtar Kelimeler: LoRaWAN, RSSI, SNR, SF, Eğri uydurma.

Regression Analysis of SNR and RSSI Relation in an Indoor LoRaWAN Network with MATLAB Curve Fitting Method

Abstract

Today, cities are growing rapidly. While increasing population reveals the requirement for more efficient use of resources in urban centers; this situation has brought along concepts of smart city and internet of things. Internet of things applications, which enable resource management, tracking, performance analysis and optimization with low-cost, wireless and remote data exchange in living spaces, bring us LoRaWAN. LoRaWAN technology has become widespread thanks to its low infrastructure cost, low battery consumption, easy installation and expandable network structure in long haul communication. In LoRaWAN network planning, RSSI, SNR and SF values are important for network efficiency. In this study, the relation between SNR and RSSI is analyzed using data obtained from an indoor LoRaWAN network and MATLAB curve fitting method. In curve fitting, polynomial, Fourier and Gaussian regression models are analyzed. In terms of goodness-of-fit parameters, it is observed that the equation of the curve with the highest fit to the network data can be obtained with a 9th order polynomial. When the goodness-of-fit comparison of curves fitted to the network data in order to define the relation between SNR and RSSI for the case where the SF parameter is constant at SF7 is made, the R^2 value is determined as 0.9362 when polynomial regression model is used, as 0.8459 when Fourier regression model is used, and as 0.8572 when Gaussian regression model is used. RMSE values are found as 0.2440 in polynomial regression model, 0.3895 in Fourier regression model and 0.3828 in Gaussian regression model.

Keywords: LoRaWAN, RSSI, SNR, SF, Curve fitting.

¹Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektronik Mühendisliği, Bursa, Türkiye, 511905009@ogr.uludag.edu.tr

²Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye, ekarlik@uludag.edu.tr

*Sorumlu Yazar/Corresponding Author

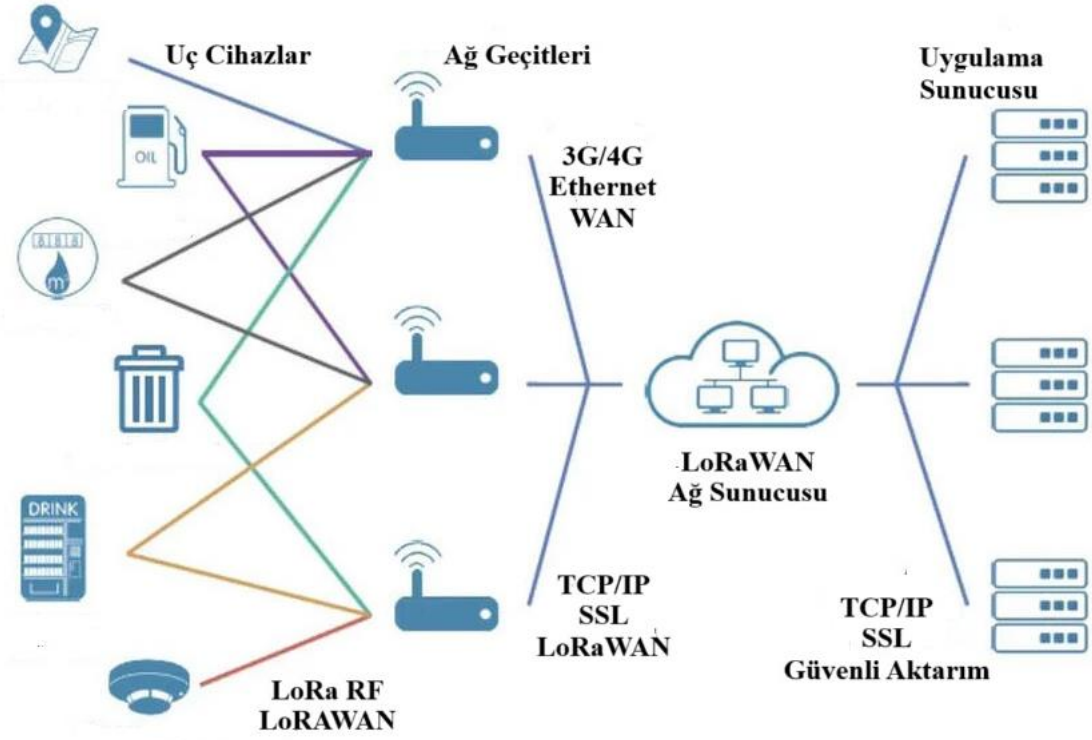
1. Giriş

Nesnelerin İnterneti (Internet of Things, IoT) kavramı gittikçe önem kazanmaktadır. Forbes raporuna göre Dünya üzerinde 2025 yılında 75 milyar bağlantılı cihazın olması beklenmektedir (Newman, 2019). IoT, tasarım, yönetim, bakım, veri, bulut ve bağlantı başlıklarını yeniden tanımlamaktadır. IoT ile, algılanan verinin uzak cihaz ve sunuculara aktarımı kolaylaşırken; sistem verimliliği artmaktadır (Chaudhari ve Zennaro, 2020). Genel olarak, IoT uygulamaları, ölçeklenebilir ağlar üzerindeki çeşitli uygulamalar için enerji tasarruflu ve düşük karmaşıklığa sahip düğümler gerektirir. Şu anda, kablosuz teknolojilerden IEEE 802.11 kablosuz yerel alan ağları (Wireless Local Area Networks, WLANs), IEEE 802.15.1 Bluetooth, IEEE 802.15.3 ZigBee, düşük hızlı kablosuz kişisel alan ağları (Low Rate Wireless Personal Area Networks, LR-WPANs) ve benzerleri, kısa menzilli ortamlarda, algılama amaçlı uygulamalarda kullanılmaktadır (Chaudhari ve Zennaro, 2020). Buna karşılık, kablosuz hücresel 4G ve 5G gibi teknolojiler uzun menzil ihtiyacını karşılamaktadır (Chaudhari ve Zennaro, 2020). WLAN ve Bluetooth yüksek hızlı veri iletişimi için tasarlanırken; ZigBee ve LR-WPAN, yerel ortamlarda kablosuz algılama uygulamaları için tasarlanmış olup uzun mesafelerde düşük veri hızı uygulamaları için kullanılır. 4G ve 5G teknolojileri, ağırlıklı olarak, kablosuz algılama uygulamaları için değil, ses ve veri iletişimi için tasarlanmıştır. Bu teknolojiler, bazı ülkelerde şu veya bu şekilde algılama için kullanılsa da, kablosuz iletişimde kullanılan performans ölçütleri açısından, performansları, sensör ağları için kabul edilebilir seviyelerde olmayabilmektedir (Chaudhari ve Zennaro, 2020). Bu nedenle, bu tür gereksinimleri desteklemek için, düşük güçlü geniş alan ağları (Low Power Wide Area Networks, LPWANs) adı verilen yeni bir IoT ağ yapısı geliştirilmiştir. LPWAN, geniş kapsama alanı, düşük güç tüketimi, düşük veri hızları ve uzun pil ömrü sağlayan kablosuz IoT iletişim teknolojisidir (URL-1, 2018).

Uzun menzilli geniş alan ağı (Long Range Wide Area Network, LoRaWAN), LPWAN teknolojilerinden biri olup günümüzde 23'ten fazla ülkede 170 adet ticari ağ operatörü tarafından kullanılmaktadır (URL-2, 2022). LoRaWAN, Uluslararası Haberleşme Birliği (International Telecommunication Union, ITU) tarafından ITU-T Y.4480 koduyla 2021 yılında uluslararası bir haberleşme standardı olarak tanımlanmıştır (URL-3, 2021).

Şekil 1'de gösterilen mimariye (URL-4, 2024) sahip LoRaWAN haberleşme ağında, farklı işlevlere sahip uç cihazlar, yukarı yönlü iletimde, mesaj paketlerini LoRa kablosuz ara yüzü aracılığıyla ağ geçidine iletmektedir. Ağ geçidi, bu mesaj paketlerini kablolu veya kablosuz iletim yöntemleri kullanarak LoRaWAN ağ sunucusuna ve uygulama sunucusuna aktarır (URL-5, 2024). LoRaWAN ağ sunucuları, kendilerine ulaşan mesaj paketlerini, türlerine göre (katılım, sorgu, uygulama) işler ve gerektiğinde aşağı yönlü bir yanıt oluşturarak sisteme iletir. LoRaWAN ağındaki uç cihazlar, donanım takibi, su sayacı takibi, hayvan takibi, sağlık verisi takibi vb. uygulamalar için

kullanılabilmektedir (Alipio ve Bures, 2024). LoRaWAN ağında, A, B ve C sınıfı olmak üzere, üç tür uç cihaz bulunmaktadır (Alipio ve Bures, 2024).



Şekil 1. LoRaWAN ağ mimarisi.

LoRaWAN haberleşme protokolünde, performans ölçüm parametrelerinden yayılım faktörü (Spreading Factor, SF), işaret-gürültü oranı (Signal-to-Noise Ratio, SNR) ve alınan işaret gücü göstergesi (Received Signal Strength Indicator, RSSI) oldukça önemlidir. Ağ kurulumlarında, uç cihaz ile ağ geçidi arasındaki mesafe ne kadar uzak olursa uç cihazın kullanacağı SF değeri o kadar yüksek olur. SF parametresinin aldığı her değere göre diğer parametrelerin alabileceği alt sınır değerler Tablo 1’de verilmiştir (Lee ve ark., 2011). LoRaWAN ağ sunucusu, uç cihaz mesajlarındaki SF, SNR ve RSSI parametrelerini de kayıt altına alır.

Tablo 1. SF parametresinin değerine göre LoRaWAN parametrelerinin alt sınır değerleri.

SF	ToA (s)	SNR (dB)	RSSI (dBm)
7	0.057	-6	-123
8	0.103	-9	-126
9	0.185	-12	-129
10	0.371	-15	-132
11	0.660	-17.5	-134.5
12	1.319	-20	-137

RSSI; kablosuz ortamdan geçtikten sonra alıcıya ulaşan işaretin güç seviyesini gösterir. LoRaWAN cihazı veya ağ geçidi tarafından alınan işaretin gücünü belirlemede kullanılır. SNR; alınan işaret gücünün iletişim kanalındaki gürültü gücüne oranıdır. LoRaWAN’da veri iletiminin kalitesini ve güvenilirliğini belirleyen önemli bir parametredir. Pil/enerji verimliliği; IoT cihazlar için önemli olup LoRaWAN cihazların, pille çalışırken, genellikle uzun süre çalışması beklenir. Pil ömrü; ağın enerji tüketimini en aza indirme ve cihazın çalışma ömrünü en üst düzeye çıkarma konusundaki verimliliğini değerlendirmek için önemli bir metriktir. Havada kalma süresi (Time on Air, ToA); bir LoRaWAN iletiminde, verinin kablosuz ortamdaki gönderim süresini ifade etmekte olup pil ömrünü ve ağ kapasitesini etkiler. Gecikme; bir paketin cihazdan ağ geçidine veya ağ geçidinden cihaza gitmesi için geçen süreyi ifade eder. Düşük gecikme, gerçek zamanlı veya zaman açısından kritik uygulamalar için gereklidir. Doğruluk; LoRaWAN ağı içindeki bir uç cihazın coğrafi konumunu belirlemedeki hassasiyet açısından kritik bir faktördür (Alipio ve Bures, 2024).

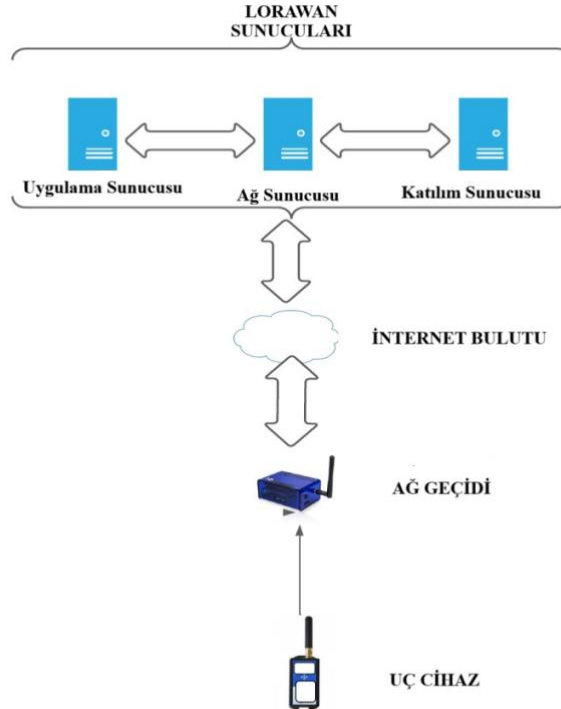
Literatürde SF, SNR ve RSSI parametrelerinin dikkate alındığı ve incelendiği çalışmalar mevcuttur. Örnek çalışmalardan bazılarında, kurulan ağdaki SF, SNR ve RSSI değerleri analiz edilmiştir (Silveira ve ark., 2021, Alkhazmi ve ark., 2023). Bir diğer araştırmada ise, SNR ve işlem hacmi (throughput) incelenirken, sadece SF ve SNR ilişkisi ile elde edilen veriler analiz edilmektedir (Purnama ve Nashiruddin, 2019). Geo-konum kapsamındaki başka bir çalışmada ise, RSSI, SNR ve paket iletim başarı oranına göre adaptif SF ataması için bir algoritma geliştirilmiştir (Ahmed ve Annamalai, 2023). Benzer bir diğer araştırmada ise, RSSI kullanılarak konum belirleme uygulamaları çalışılmış; işaret üzerindeki çevresel etkenlerin analizi ile uzun ve kısa mesafelerdeki yol kaybı etkileri incelenmiştir (Moradbeikie ve ark., 2023). RSSI odaklı bir başka çalışma ise, akıllı şehir uygulamalarından olan akıllı park için geliştirilmiş bir LoRaWAN uygulamasını içermektedir (Santana ve ark., 2023). LoRaWAN’ın sualtı sistemlerinde kullanımına odaklanan bir diğer araştırmada, SF, SNR, RSSI ve paket kaybı arasındaki ilişki incelenmiştir (Damayanti ve ark., 2024). LoRaWAN performans analizleri yalnızca açık alanlarla sınırlı kalmayıp, ormanlık alanlarda da gerçekleştirilmiş; bu bağlamda, SF, SNR, RSSI ve paket iletim oranı parametrelerinin mesafe ile ilişkisi değerlendirilmiştir (Sharma ve ark., 2022). Deneysel çalışmalar kapsamında gerçekleştirilen bir diğer araştırmada ise, bir yerleşkede LoRa kullanılarak SF, SNR, RSSI ve paket iletim oranlarının görüş açısının mevcut olduğu ve olmadığı senaryolara göre nasıl değiştiği analiz edilmiştir (Kaur ve ark., 2024). Atıfta bulunulan yukarıdaki çalışmaların yanısıra, yapılan kapsamlı literatür analizi sonucunda, SF, SNR, RSSI ve paket kaybı ilişkilerinin eğri uydurma regresyon modelleri ile analiz edildiği ve ağ verimliliğin bu çerçevede incelendiği bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Bu makalede, sabit SF değeri ve kabul edilebilir paket kayıp oranı için, SNR ve RSSI değerleri arasındaki ilişkinin tespit edilmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda, MATLAB eğri uydurma aracı (Curve Fitting Toolbox) kullanılarak, regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analiz sayesinde,

LoRaWAN için önemli olan performans parametreleri arasındaki ilişki ile ilgili yeni bir çıktı elde edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

Şekil 2’de gösterildiği gibi, 1 adet ağ geçidi ve 1 adet uç cihaz ile birlikte bina içi ortamda kurulan LoRaWAN ağında, SF, RSSI, SNR performans parametreleri ve paket kaybı değerleri üzerinden incelemeler yapılmıştır. Testleri gerçeklemek için kurulan sistem bileşeni, Şekil 3 ile verilen LoRaWAN uç cihazından oluşmaktadır. LoRaWAN uç cihazı ile ağ geçidi bir binanın aynı katında bulunmaktadır. Uç cihaz, periyodik zaman aralıklarıyla, yukarı yönde, LoRa kablosuz arayüzü ile ağ geçidine mesaj paketleri göndermektedir. Ağ geçidi ise kablosuz internet üzerinden internete bağlanmakta, bulutta çalışan ağ sunucuları ile uçtan uca ağ tasarımı tamamlanmaktadır. Uç cihaz, ağ geçidi ve diğer sistem parametreleri buluttaki sunucu sistemlerinde tanımlanmıştır. Kurulum sonrası sistemin ürettiği ve ağ sunucusu tarafından kayıt altına alınan SF, SNR, RSSI değerleri ve paket iletim sayıları belirlenmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan veri seti, kurulan LoRaWAN ağından elde edilen bu sistem kayıtlarından oluşmaktadır.



Şekil 2. Kurulan LoRaWAN ağının mimarisi.



Şekil 3. LoRaWAN uç cihazı.

Ağdaki uç cihaza ait teknik özellikler Tablo 2 ile verilmiştir (URL-6, URL-7, 2024). Ağ geçidi için RAK Wireless markasının Şekil 4’te verilen ürünü kullanılmış olup teknik özellikleri Tablo 3’te açıklanmıştır (URL-8, 2024). Ağ sunucusu olarak The Things Network yapısı kullanılmıştır (URL-9, 2024).

Tablo 2. Uç cihaz teknik özellikleri.

Özellik	Açıklama
LoRaWAN versiyonu	LoRaWAN 1.0.2 – Sınıf A
LoRaWAN çıkış gücü	14 dBm (maksimum)
LoRaWAN alıcı hassasiyeti	-146 dBm (minimum)
Pil ömrü	3 yıl
Çalışma sıcaklıkları	-40° C - 80° C
Boyutlar	35 x 85 x 33 mm
Frekans	EU868 MHz



Şekil 4. LoRaWAN ağ geçidi.

LoRaWAN uç cihazının kurulumuna ait foto Şekil 5’te verilmiştir. Bina içinde kurulan LoRaWAN ağından elde edilen 67 günlük veriler kayıt altına alınmıştır.

Tablo 3. Ağ geçidi teknik özellikleri.

Özellik	Açıklama
LoRaWAN versiyonu	LoRaWAN 1.0.2 –Sınıf A
LoRaWAN çıkış gücü	27 dBm (maksimum)
LoRaWAN alıcı hassasiyeti	-142 dBm (minimum)
Besleme değerleri	DC 5V / 2.5 A
Çalışma sıcaklıkları	-10° C - 65° C
Boyutlar	66 x 96 x 47 mm
Frekans	EU868 MHz

**Şekil 5.** Uç Cihaz kurulumu.

Kaydedilen veriler analiz edilerek aralarındaki ilişki MATLAB eğri uydurma aracı ile incelenmiştir. MATLAB eğri uydurma aracı, birden fazla değişkenin aralarındaki ilişkiyi formüle etmeye yarayan bir araçtır. Veri analizi yapılmasına, verilerin işlenmesine, aday modellerin karşılaştırılmasına ve aykırı değerlerin kaldırılmasına olanak tanır. Sağlanan doğrusal ve doğrusal olmayan model kitaplığı kullanılarak, regresyon analizi yapılabilir veya özel denklemler belirlenebilir. Bu araç, ayrıca, spline, interpolasyon ve yumuşatma gibi parametrik olmayan modelleme tekniklerini destekler. Bir uyum oluşturduktan sonra, çizim, interpolasyon ve ekstrapolasyon için çeşitli son işlem yöntemleri uygulanabilir; güven aralıkları tahmin edilebilir (URL-10, 2024). Uç cihaz ile ilgili elde edilen veriler, eğri uydurma aracında analiz edilmiştir. Tablo 4, eğri uydurma aracında bulunan uyum iyiliği (Goodness-of-Fit, GoF) parametrelerini ve açıklamalarını göstermektedir (URL-11, 2024).

Tablo 4. MATLAB eğri uydurma aracının uyum iyiliği parametreleri.

Parametre	Açılımı
RMSE	Kök Ortalama Kare Hatası (Root Mean Square Error)
R ²	R-Kare (R-Square)
Adj-R ²	Düzeltilmiş R-Kare (Adjusted R-Square)
SSE	Karesel Hataların Toplamı (Sum of Squared Errors)

RMSE: n skaler gözlemden oluşan gerçek dizi A ve bir tahmin dizisi F söz konusu iken, RMSE (1) ile tanımlanır.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |A_i - F_i|^2} \quad (1)$$

RMSE için en iyi değer 0 olup, çıkan sonuç 0 değerine ne kadar yakın ise veri seti ile eğri sonucu arasındaki uyum o kadar doğrudur (URL-12, 2024).

R^2 ve Adj- R^2 : Uyum, bir istatistik geçerlilik barındırmak zorundadır ve bu iki değer, uyumun verilerin varyasyonunu açıklamada ne kadar başarılı olduğunu gösterir. Başka bir deyişle R^2 , gözlenen değerler ile tahmin edilen değerler arasındaki korelasyon katsayısının karesidir. Çoklu korelasyon katsayısının karesi ve belirleme katsayısı olarak da adlandırılır. R^2 , regresyonun kareler toplamı (Sum of Squares of Regression, SSR) ile toplam kareler toplamının (Total Sum of Squares, SST veya TSS) oranı olarak tanımlanır (URL-13, 2024).

SSR,

$$SSR = \sum_{i=1}^n w_i (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (2)$$

ile hesaplanır. Burada, w_i , i . ağırlık katsayısı; $\hat{y}_i$, i . tahmin edilen değer ve $\bar{y}$ gözlenen değerlerin ortalamasıdır (URL-13, 2024).

SST,

$$SST = \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \bar{y})^2 \quad (3)$$

ile belirlenir. Burada y_i i . gözlenen değerdir (URL-13, 2024).

(2) ve (3) denklemleri göz önüne alındığında, R^2 ,

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (4)$$

ile ifade edilir. (4) formülündeki SSE,

$$SSE = \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5)$$

ile elde edilir. Burada, SSE değerinin 0'a yakın olması (dolayısıyla R^2 'nin 1 değerine yaklaşması), hatanın az ve uyum iyiliğinin yüksek olduğu anlamını taşır.

Adj- R^2 ,

$$R^2_{adj} = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p} \right) \frac{SSE}{SST} \quad (6)$$

ile hesaplanır (URL-12, 2024). Burada, n gözlem sayısı ve p regresyon katsayısı değeridir. Örneğin, doğrusal bir uyum için p değeri 2'dir. Adj- R^2 , 0 ile 1 arasında değer alabilir. Adj- R^2 değeri 1'e ne kadar yakın ise uyum o kadar iyidir (URL-13, 2024).

3. Bulgular ve Tartışma

Kurulan iç ortam LoRaWAN ağından elde edilen veri seti hakkındaki bilgiler, Tablo 5 ile verilmiştir.

Tablo 5. Kurulan LoRaWAN ağından elde edilen veri seti hakkındaki bilgiler.

Veri Türü	Değer
Kayıt Süresi (Gün)	67
Tarih Aralığı	23.07.2024-27.09.2024
SF	7
Başarıyla İletilen Paket Sayısı (Adet)	165
Başarıyla İletilen Paket/Gönderilen Toplam Paket (Adet/Adet)	165/194
Paket İletim Başarı Oranı (%)	%85.05
Ortalama SNR (dB)	7.46
Ortalama RSSI (dBm)	-96.43

Tablo 1'de belirtildiği gibi 7-12 arasında değişen değerler alabilen SF, sistem tarafından otomatik olarak atanmakta olup kullanıcı tercihiyle belirlenmemektedir. Kurulan ağda, ağ geçidi ile uç cihaz arasındaki mesafenin yakın olması ve kayıt süresince bu mesafenin sabit kalması nedeniyle, SF sürekli olarak 7 değerini almıştır. Uç cihazdan gönderilen toplam 194 mesajdan 165'i ağ sunucusuna ulaşarak değerlendirmeye alınmıştır. Kablosuz iletişimde meydana gelebilecek yol kayıplarının, iletim hatalarının, uç cihazdan ya da ağdan kaynaklanan çeşitli aksaklıkların bu duruma neden olduğu düşünülmektedir. Ağda yalnızca tek bir uç cihaz bulunduğundan, paket iletim başarı oranına yönelik karşılaştırmalı bir analiz gerçekleştirilmemiştir. Ağ sunucusuna ulaşan 165 adet mesajdan elde edilen RSSI ve SNR ortalama değerlerinin yanısıra paket iletim başarı oranı da Tablo 5'te sunulmuştur.

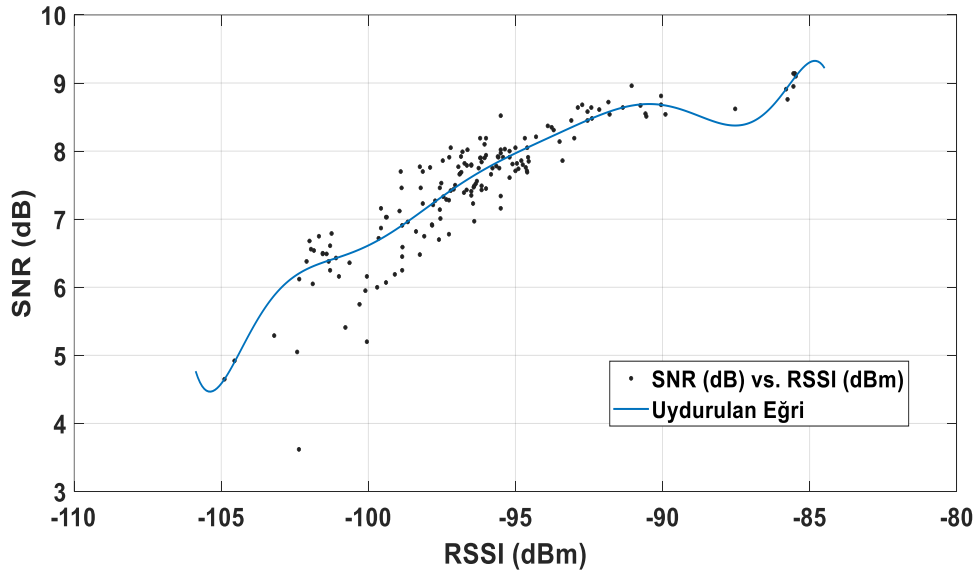
Tablo 6, veri setindeki RSSI ve SNR değerlerinden elde edilen minimum, maksimum, ortalama, medyan, mod ve değişim aralığı gibi istatistiki verileri göstermektedir.

Tablo 6. Veri setindeki RSSI ve SNR değer dağılımından elde edilen istatistiki veriler.

	RSSI (dBm)	SNR (dB)
Minimum	-104.9	3.62
Maksimum	-85.47	9.14
Ortalama	-96.43	7.46
Medyan	-96.5	7.69
Mod	-95.5	7.91
Değişim Aralığı	19.43	5.52

Veri setinden elde edilen değerler, MATLAB üzerinde eğri uydurma yöntemi ile analiz edilmiştir. Bu analiz sayesinde, iç ortamda kurulu bir LoRaWAN ağında, SNR ile RSSI arasındaki ilişki regresyon modelleri ile incelenmiş ve formüle edilmiştir. Bu ilişkilerin gösterildiği grafikler Şekil 6, Şekil 7 ve Şekil 8 ile verilmiştir.

Şekil 6’da, siyah noktalar, ağdan elde edilen RSSI ve SNR değerlerini; mavi renkli eğri ise, SNR ve RSSI değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren, eğri uydurma yöntemi ile belirlenen ve polinom regresyon modeline karşılık gelen eğriyi göstermektedir. Şekil 6’da verilen eğrinin, ağ verileriyle uyum iyiliğini belirten parametreler Tablo 7’de sunulmuştur.



Şekil 6. SNR ve RSSI arasındaki ilişkiyi gösteren grafik (polinom regresyon modeli).

Tablo 7. SNR-RSSI eğrisinin uyum iyiliği parametreleri (polinom regresyon modeli için).

Parametre	Değer
SSE	9.2273
R ²	0.9362
Adj-R ²	0.9325
RMSE	0.2440

Şekil 6'daki, SNR ve RSSI ilişkisini gösteren eğrinin denklemi

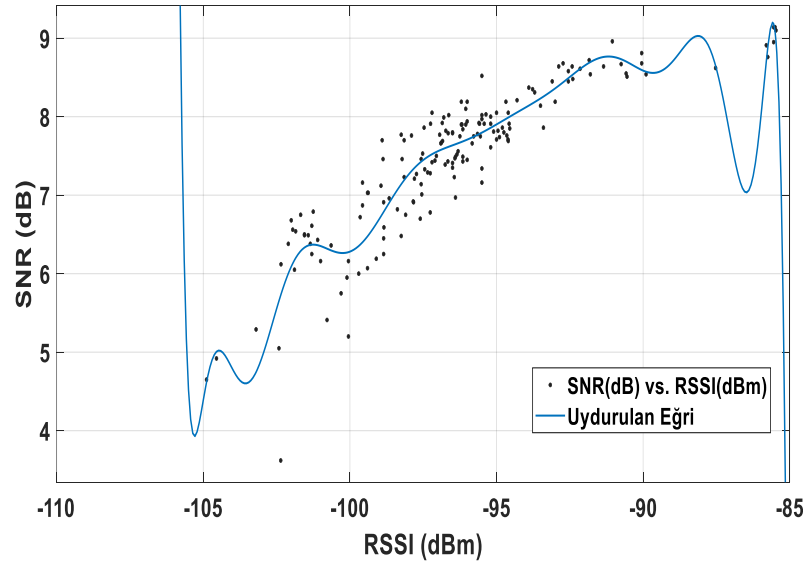
$$SNR = \sum_{i=0}^9 p_i \cdot (RSSI)^i \quad (7)$$

şeklinde olup p_i katsayıları Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Polinom regresyon modeli ile elde edilen eğri denkleminin katsayıları.

Katsayı	Değer
p_0	7.6365
p_1	0.9796
p_2	-0.3390
p_3	0.0073
p_4	0.2945
p_5	-0.0938
p_6	-0.0969
p_7	0.0304
p_8	0.0086
p_9	-0.0026

Denklem (7) ve Tablo 8'den görüldüğü üzere, SNR-RSSI ilişkisini veren polinom, MATLAB eğri uyduma aracının izin verdiği en yüksek derece olan 9. dereceden polinomdur. Daha düşük dereceli polinomlar denendiğinde, R^2 ve RMSE değerlerinin, 9. dereceden polinom sonuçlarına kıyasla daha düşük uyumluluğu işaret eden sonuçlar verdiği görülmüştür.



Şekil 7. SNR ve RSSI arasındaki ilişkiyi gösteren grafik (Fourier regresyon modeli).

Şekil 7'de, siyah noktalar, ağdan elde edilen RSSI ve SNR değerlerini; mavi renkli eğri ise, SNR ve RSSI değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren, eğri uydurma yöntemi ile belirlenen ve Fourier

regresyon modeline karşılık gelen eğriyi göstermektedir. Şekil 7’de verilen eğrinin, ağ verileriyle uyum iyiliğini belirten parametreler Tablo 9’da sunulmuştur.

Tablo 9. SNR-RSSI eğrisinin uyum iyiliği parametreleri (Fourier regresyon modeli için).

Parametre	Değer
SSE	22.3050
R ²	0.8459
Adj-R ²	0.8280
RMSE	0.3895

Şekil 7’deki, SNR ve RSSI ilişkisini gösteren eğrinin denklemi

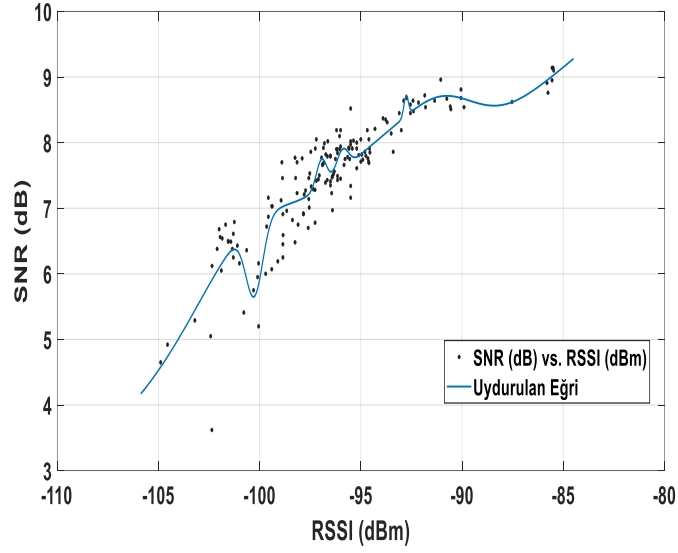
$$SNR = \sum_{i=0}^8 a_i \cdot \cos(i \cdot w \cdot RSSI) + b_i \cdot \sin(i \cdot w \cdot RSSI) \quad (8)$$

şeklinde olup a_i , b_i ve w katsayıları Tablo 10’da verilmiştir.

Tablo 10. Fourier regresyon modeli ile elde edilen eğri denkleminin katsayıları.

Katsayı	Değer
a_0	1.2930×10^9
a_1	0
b_1	-4.5538×10^{10}
a_2	-4.9115×10^9
b_2	6.4413×10^{10}
a_3	7.3008×10^9
b_3	-5.3613×10^{10}
a_4	-5.8801×10^9
b_4	3.0508×10^{10}
a_5	3.0106×10^9
b_5	-1.2101×10^{10}
a_6	-9.8711×10^8
b_6	3.2308×10^9
a_7	1.9107×10^8
b_7	-5.2535×10^8
a_8	-1.6742×10^7
b_8	3.9488×10^7
w	0.0539

Şekil 8’de, siyah noktalar, ağdan elde edilen RSSI ve SNR değerlerini; mavi renkli eğri ise, SNR ve RSSI değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren, eğri uydurma yöntemi ile belirlenen ve Gauss regresyon modeline karşılık gelen eğriyi göstermektedir. Şekil 8’de verilen eğrinin, ağ verileriyle uyum iyiliğini belirten parametreler Tablo 11’de sunulmuştur.



Şekil 8. SNR ve RSSI arasındaki ilişkiyi gösteren grafik (Gauss regresyon modeli).

Tablo 11. SNR-RSSI eğrisinin uyum iyiliği parametreleri (Gauss regresyon modeli için).

Parametre	Değer
SSE	20.6652
R^2	0.8572
Adj- R^2	0.8339
RMSE	0.3828

Tablo 12. Gauss regresyon modeli ile elde edilen eğri denkleminin katsayıları.

Katsayı	Değer
a_1	2.8521
b_1	-97.9110
c_1	5.3457
a_2	0.6790
b_2	-91.0085
c_2	2.4514
a_3	0.3169
b_3	-92.7618
c_3	0.1547
a_4	0.3311
b_4	-95.9062
c_4	0.4149
a_5	0.4341
b_5	-96.9416
c_5	0.3629
a_6	-1.1318
b_6	-100.2621
c_6	0.5948
a_7	-1.4335
b_7	-97.4803
c_7	3.2396
a_8	13.0624
b_8	-60.3599
c_8	41.2263

Şekil 8’deki, SNR ve RSSI ilişkisini gösteren eğrinin denklemi,

$$SNR = \sum_{i=1}^8 a_i \cdot e^{\left(\frac{RSSI-b_i}{c_i}\right)^2} \quad (9)$$

şeklinde olup a_i , b_i ve c_i katsayıları Tablo 12’de verilmiştir.

4. Sonuç

Bu çalışmada, bir bina içi LoRaWAN ağından elde edilen SF, SNR ve RSSI verileri kullanılarak, MATLAB eğri uydurma yöntemi ile SNR ve RSSI arasındaki ilişki incelenmiştir. Bu ilişkiyi tanımlayan ampirik denklemler, polinom, Fourier ve Gauss regresyon modelleri kullanılarak türetilmiştir. SNR-RSSI ilişkisinin, $R^2=0.9362$ ve $RMSE=0.2440$ ile ağdan elde edilen verilere en yüksek uyum iyiliği gösteren 9. dereceden bir polinom ile ifade edilebildiği belirlenmiştir. Regresyon modellerinden elde edilen karşılaştırmalı uyum iyiliği sonuçları Tablo 13’te verilmiştir.

Tablo 13. Polinom, Fourier ve Gauss regresyon modellerinden elde edilen karşılaştırmalı uyum iyiliği sonuçları.

Regresyon modeli	SSE	R^2	Adj- R^2	RMSE
Polinom	9.2273	0.9362	0.9325	0.2440
Fourier	22.3050	0.8459	0.8280	0.3895
Gauss	20.6652	0.8572	0.8339	0.3828

Elde edilen sonuçlar, bina içi LoRaWAN ağlarında sabit SF durumlarında SNR-RSSI ilişkisini modellemeyi amaçlayan çalışmalar için referans olma özelliğindedir. Ayrıca, sabit SF değerli ve kabul edilebilir paket kayıp oranlı (bu çalışmada tespit edilen % 15 ve altındaki oranlara sahip) iç ortam ağ planlamalarında, bu çalışmada elde edilen eğri formüllerinin referans alınabileceği değerlendirilmektedir.

Gelecekteki çalışmalarda, çoklu uç cihazların bulunduğu LoRaWAN ağlarına odaklanılarak, elde edilecek büyük veri setleri ile,

- değişken SF değerleri altında, SF-SNR-RSSI ilişkilerini tanımlayan ve uyum iyiliği daha yüksek eğri denklemlerinin türetilmesi
- makine öğrenmesi yöntemleri ile yüksek doğruluklu parametre/performans tahminleme çalışmalarının yapılması
- paket iletim hata oranlarının detaylı analizlerinin yapılması

hedeflenmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma, Bursa Uludağ Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP) Koordinatörlüğü tarafından, FGA-2023-1297 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.

Yazarların Katkısı

Ömer YLDIZ: Kavramsallaştırma, metodoloji, biçimsel analiz, araştırma, veri toplama, görselleştirme, makale taslak yazımı.

Sait Eser KARLIK: Proje yönetimi, kavramsallaştırma, metodoloji, araştırma, makale taslak yazımını gözden geçirme ve düzenleme.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar, makalenin değerlendirme sürecini etkileyebilecek herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkarları bulunmadığını onaylamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Ahmed, S. T., ve Annamalai, A., (2023, Mayıs). Improving Geo-Location Performance of LoRa with Adaptive Spreading Factor, *2023 IEEE 13th Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics (ISCAIE)*, (s. 386-391), Penang, Malaysia. <https://doi.org/10.1109/ISCAIE57739.2023.10165296>
- Alipio, M., ve Bures, M., (2024). Current testing and performance evaluation methodologies of LoRa and LoRaWAN in IoT applications: Classification, issues, and future directives, *Internet of Things*, 25, 101053. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.101053>
- Alkhazmi, E. H., Elkawafi, S. M., Aldarrat, A. A., Abbas, M. A., Abubakr, H., ve Shamatah, H.A., (2023, Aralık). Analysis of Real-World LoRaWAN Network Performance Across Outdoor and Indoor Scenarios, *2023 IEEE 11th International Conference on Systems and Control (ICSC)*, (s. 329-334), Sousse, Tunisia. <https://doi.org/10.1109/ICSC58660.2023.10449775>
- Chaudhari, B., ve Zennaro, M., (2020). *LPWAN technologies for IoT and M2M applications: Introduction to low-power wide-area networks*. Elsevier Inc. Academic Press.
- Damayanti, S. D., Suryanegara M. ve Hayati N., (2024, Temmuz). LoRaWAN for Underwater System: Early Results from Performance Testing on the Swimming Pool, *2024 7th International Conference on Communication Engineering and Technology (ICCET)*, (s. 47-53), Tokyo, Japan. <https://doi.org/10.1109/ICCET62255.2024.00015>
- Kaur, G., Balyan, V., Gupta, S.H., (2024). Experimental analysis of low-duty cycle campus deployed IoT network using LoRa technology, *Results in Engineering*, 23, 102844. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102844>.

- Lee, S., Lee, J., Park, H.-S., ve Choi, J.-K., (2021). A novel fair and scalable relay control scheme for Internet of Things in LoRa-based low-power wide-area networks. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(7), 5985-6001. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3034185>
- Moradbeikie, A., Keshavarz, A., Rostami, H., Paiva, S., ve Lopes, S. I., (2023). A cost-effective LoRaWAN-based IoT localization method using fixed reference nodes and dual-slope path-loss modeling, *Internet of Things*, 24, 100990. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100990>
- Newman, D., (2019). Return on IoT: Dealing with the IoT skills gap, Retrieved from Forbes Web site: <https://www.forbes.com/sites/danielnewman/2019/07/30/return-on-iot-dealing-with-the-iot-skills-gap/>
- Purnama, A. A. F., ve Nashiruddin, M. I., (2019, Aralık). Designing LoRaWAN Internet of Things Network for Advanced Metering Infrastructure (AMI) in Surabaya and Its Surrounding Cities, *2019 International Seminar on Research of Information Technology and Intelligent Systems (ISRITI)*, (s. 194-199) Yogyakarta, Indonesia. <https://doi.org/10.1109/ISRITI48646.2019.9034571>
- Silveira, J. D. F., Veloso, A. F. da S., Júnior, J. V. dos R., Soares, A. C. B., ve Rabêlo, R. A. L., (2021, Ekim). A New Low-Cost LoRaWAN Power Switch for Smart Farm Applications, *2021 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, (s. 3330-3335) Melbourne, Australia. <https://doi.org/10.1109/SMC52423.2021.9659076>
- Santana, J. R., Sotres, P., Pérez, J., Sánchez, L., Lanza, J., Muñoz, L., (2023). Assessing LoRaWAN radio propagation for smart parking service: An experimental study, *Computer Networks*, 235, 109962. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2023.109962>
- Sharma, A., Kapoor, D. S., Nayyar, A., Qureshi, B., Singh, K. J., ve Thakur, K., (2022). Exploration of IoT nodes communication using LoRaWAN in forest environment, *Computers, Materials and Continua*, 71(3), 6239-6256. <https://doi.org/10.32604/cmc.2022.024639>.
- URL-1: Internet Engineering Task Force (IETF), Low-power wide area network (LPWAN) overview, 2018. <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8376>, (Erişim Tarihi: 15 Ekim 2024).
- URL-2: LoRa Alliance® achieves 66% growth in public LoRaWAN® networks over past 3 years, LoRa Alliance®, 2022. <https://resources.lora-alliance.org/home/lora-alliance-achieves-66-growth-in-public-lorawan-networks-over-past-3-years>, (Erişim Tarihi: 15 Ekim 2024).
- URL-3: ITU-T Y.4480 (11/2021), Low power protocol for wide area wireless networks. <https://www.itu.int/rec/T-REC-Y.4480-202111-I>, (Erişim Tarihi: 15 Ekim 2024).
- URL-4: LoRa: Kablosuz Haberleşmenin Yükselen Yıldızı. <https://gsl.com.tr/lora-kablosuz-haberlesmenin-yukselen-yildizi.html>, (Erişim Tarihi: 15 Ekim 2024)
- URL-5: LoRaWAN® network architecture. <https://lora-alliance.org/about-lorawan/>, (Erişim Tarihi: 15 Ekim 2024).
- URL-6: Skysens motion acceleration monitoring device. https://store.gsl.com.tr/class/INNOVAEditor/assets/Motion_Module_SKYMOT1_ACC_Datasheet_v1_04.pdf, (Erişim Tarihi: 15 Ekim 2024).
- URL-7: RN2483 Low-power long range LoRa® technology transceiver module, Microchip Corporation. <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/OTH/ProductDocuments/DataSheets/RN2483-Low-Power-Long-Range-LoRa-Technology-Transceiver-Module-DS50002346F.pdf>, (Erişim Tarihi: 15 Ekim 2024).
- URL-8: RAK7246G WisGate Developer D0 Gateway Datasheet. <https://docs.rakwireless.com/Product-Categories/WisGate/RAK7246G/Datasheet/>, (Erişim Tarihi: 15 Ekim 2024).
- URL-9: The Things Network. <https://www.thethingsnetwork.org/>, (Erişim Tarihi: 15 Ekim 2024).
- URL-10: Curve fitting toolbox. https://www.mathworks.com/help/curvefit/index.html?s_tid=CRUX_lftnav, (Erişim Tarihi: 15 Ekim 2024).
- URL-11: Goodness of fit. https://www.mathworks.com/help/ident/ref/goodnessoffit.html?s_tid=doc_ta, (Erişim Tarihi: 15 Ekim 2024).
- URL-12: RMSE. https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/rmse.html?s_tid=doc_ta, (Erişim Tarihi: 15 Ekim 2024).
- URL-13: Evaluating goodness of fit. <https://www.mathworks.com/help/curvefit/evaluating-goodness-of-fit.html>, (Erişim Tarihi: 15 Ekim 2024).