

## Akıllı elektrik sayacı ile enerjinin takip ve kontrolü

*Tracing and controls of energy with smart electricity meters*

Mertcan NANE\*<sup>1,a</sup> , Halil GÖK<sup>1,b</sup> , Ömür AKYAZI<sup>2,c</sup> , Canan AKSOY<sup>3,d</sup> 

<sup>1,3</sup>Karadeniz Teknik Üniversitesi, Of Teknoloji Fakültesi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Bölümü, 61830, Trabzon, Türkiye

<sup>2</sup>Karadeniz Teknik Üniversitesi, Of Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, 61830, Trabzon, Türkiye

• Geliş tarihi / Received: 30.12.2022

• Kabul tarihi / Accepted: 02.09.2023

### Öz

Yaşamımızın her alanında ihtiyaç duyduğumuz elektrik enerjisi, kullanılan enerji kaynaklarının sınırlı olması ve enerjiye olan talebin sürekli olarak artması karşısında sürdürülebilir olması için enerjinin verimli kullanılması gerekmektedir. Akıllı elektrik sayaçları, bağlı oldukları elektrik şebekesinin elektriksel değerlerini ölçen, ölçüm değerlendirmelerine bağlı olarak fatura hesabı çıkaran, haberleşme teknolojileriyle enerjiyi uzaktan takip ve kontrolünü (açma-kapatma) sağlayan akıllı ölçümleme cihazlarıdır. Bu çalışmada, tek fazlı akıllı elektrik sayacı tasarımı yazılımsal ve donanımsal olarak gerçekleştirilmiş olup laboratuvar ortamında test edilmiştir. Tasarımda kullanılan STM32F103 mikrokontrolcü ile alınan enerji ölçüm verileri, hem Wi-Fi hem de LoRa RF haberleşmesi ile aktarılmıştır. Bunlara ek olarak, mobil uygulama arayüzü geliştirilmiş ve tüm tüketim verileri tüketicilere cep telefonları üzerinden sunulmuştur. Deneysel çalışmaların sonucuna göre cihazın ölçüm doğruluğu %99'dan büyük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, proje kapsamında LoRa RF haberleşme altyapısı kurulumu için elektrik sayaçların aynı zamanda modem olarak da kullanılabilceği gösterilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Akıllı elektrik sayacı, Akıllı şebekeler, Enerji, Tasarruf, Uzaktan okuma, Verim

### Abstract

The electrical energy we need in every aspect of our lives must be used efficiently in order to be sustainable in the face of the limited energy resources and the continuous increase in the demand for energy. One of the ways to use energy efficiently is to control the energy continuously with smart meters. Smart electricity meters are intelligent measuring devices that measure the electrical values of the connected electrical grid, generate billing based on measurement evaluations, and enable remote monitoring and control (switching on/off) of energy through communication technologies. In this study, the design of a single-phase smart electricity meter was carried out in software and hardware and tested in a laboratory environment. The energy measurements taken with the STM32F103 microcontroller used in the design were transferred via both Wi-Fi and LoRa RF communication. In addition, the mobile application interface has been developed and all consumption data is presented to consumers via mobile phones. According to the results of the experimental studies, it has been observed that the measurement accuracy of the device is greater than 99%. In addition, it has been shown that electricity meters can also be used as modems for the installation of LoRa RF communication infrastructure within the scope of the Project.

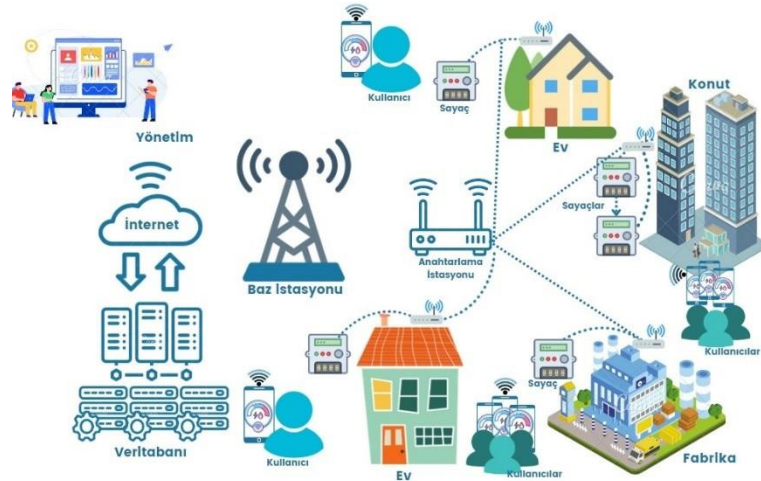
**Keywords:** Smart electricity meter, Smart grid, Energy, Saving, Remote reading, Efficiency

\*<sup>a</sup> Mertcan NANE; 397295@ogr.ktu.edu.tr

## 1. Giriş

### 1. Introduction

Gündelik yaşantımızın her alanında kullandığımız elektrik enerjisi, kullanılan kaynakların sınırlı olması ve enerjiye olan talebin her geçen gün artması nedeniyle mevcut kaynakların verimli kullanılması gerekmektedir (Kocaman, 2018). Enerjinin üretimden tüketime kadar izlediği tüm süreçte birçok kayıplara uğramaktadır. Enerjinin verimli kullanılması, kayıpların optimize edilmesi ya da yok edilmesi ile sağlanmaktadır (Düzgün, 2018). Enerji kayıpları hem üretici tarafında hem de tüketici tarafında olabilmektedir. Üretici tarafından incelendiğinde teknik ekipmanların hassasiyetinin sapması, iletim hatlarının uyumsuzluğu, soğutma sistemlerinin verimli çalışmaması, enerji dönüşümlerinden kaynaklanan kayıplar gibi senaryolar karşımıza çıkabilmektedir. Tüketici tarafında incelendiğinde ise enerjinin usulsüz (kaçak) kullanılması ve enerjinin bilinçli tüketilmemesi olarak ifade edilebilir (Fourie & Calmeyer, 2004; Xudong vd., 2021). Bahsi geçen tüm bu kayıpların azaltılması, akıllı elektrik şebekelerinin ana hedeflerinden biridir (Eldem, 2017; Martins vd., 2019). Geleneksel elektrik şebekeleri incelendiğinde enerji tüketim takibinin işçilik maliyeti olması, güvenilirlik ve kararlılık noktalarında sorunların ortaya çıktığı gözlemlenmiştir (Önen & Kuran, 2015). Akıllı elektrik şebekeleri kavramıyla birlikte enerjinin üretim, dağıtım ve tüketim noktalarının her birinde hükmü olan, varlığı sürdürülebilir, bilgi ve haberleşme teknolojileri alt yapısı kullanan ve ana hedefi enerji verimliliği olan modern bir elektrik şebekesi modellenmiştir (İlisu vd., 2020; Salman, 2019; Akkaya O. S. vd., 2021). Enerji şirketleri, ulusal ölçekte enerji ihtiyacını verimli bir şekilde tedarik etmek için akıllı elektrik şebekesi alt yapılarına ciddi yatırımlar yapmaktadır (Bayindir, 2016). Planlanan alt yapıyla birlikte elektrik şebekesinin hem saha içi hem saha dışı operasyonlarını gerçek zamanlı takip ve kontrolü sağlanmaktadır. Akıllı elektrik şebekesinin en önemli bileşeni olan akıllı elektrik sayacı kavramıyla birlikte enerjinin ölçülmesi, faturalandırılması, tüketim verilerinin haberleşme altyapısı kullanarak uzaktan okunabilmesi (USOS) ve enerjinin uzaktan kontrolü sağlanabilmektedir (Jixuan vd., 2013). Enerji tüketicileri gerçek zamanlı ve güncel olacak biçimde tüketim verilerini takip edebileceğinden gereksiz harcamalarını azaltarak fatura fiyatlarını düşürebileceklerdir. Böylece, elektrik enerjisi efektif biçimde kullanılarak arz ve talep dengesinin güvenliği sağlanmış olur (Dileep, 2020; Karaman vd., 2021). Akıllı elektrik sayaçları üretiminden, tüketime kadar olan süreçte birçok operasyonel uygulama alanı bulunmaktadır (Aktaş, vd., 2021). Şekil 1’de sistemin operasyonel gösterimi verilmiştir.



**Şekil 1.** Akıllı elektrik sayaçlarının operasyonel gösterimi

**Figure 1.** Operational presentation of smart electricity meters

Literatürde, elektrik sayaçlarının uzaktan okunabilmesi için birçok farklı haberleşme çözümleri kullanılmıştır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde çoğunlukla bir elektrik sayacının RS-485 haberleşme portundan erişim sağlanarak ve bir haberleşme tekniği kullanarak elektrik sayaçlarına ait akım, gerilim, aktif güç, pasif güç ve güç faktörü gibi verilerin uzaktan okunması gözlemlenmiştir.

Bu çalışmada, elektrik enerjisi tüketicilerinin tüketim bilgilerini haberleşme teknolojileri aracılığıyla gerçek zamanlı olarak takip edebilmeleri amacıyla bir akıllı elektrik sayacı tasarlanmıştır.

Tasarlanan STM32F103 mikrokontrolcü tabanlı elektronik sistemin, PZEM-004T enerji ölçüm modülü tarafından alınan ölçüm verilerinin işlenmesiyle elde edilen fatura bilgileri, internet erişimi olan coğrafi

bölgelere Wi-Fi modülü ile birlikte TCP/IP tabanlı MQTT haberleşme protokolü üzerinden Shifter.io Cloud sunucusuna, internet erişimi olmayan bölgelere ise LoRa RF haberleşme modülü ile veri merkezine kablosuz olarak aktarılmıştır. App Inventor programında tasarlanan mobil arayüzü uygulaması ile birlikte bahsi geçen tüm veriler bulut sunucusundan alınarak tüketicilere cep telefonları veya tablet bilgisayarlarından anlık olarak akım, gerilim, aktif güç, reaktif güç, faz farkı, frekans, güç faktörü ve fatura bilgileri hem sayısal hem de grafiksel olarak sunulmuştur. Tasarımı yapılan cihazın elektrik enerjisi ile beslenen mesken hanelere entegrasyonu uyumlu olacak şekilde olması dikkate alınmıştır. Ayrıca, mevcut piyasada var olan cihazlarla arasındaki fark hem ölçü aleti olarak hem de modem cihazı olarak kullanılabilir olmasıdır.

Makalenin devam eden bölümlerinde, materyal ve metot başlığı altında elektrik sayacının ölçme teorisi, haberleşme sistemi performans analizleri ve internet bağlantısının katmanları anlatılmıştır. Deneysel çalışma başlığı altında sistemin hem donanım hem de yazılım olarak üzere tasarımı ve işleyişi anlatımı yapılmıştır. Cihazın test sonuçlarına karşı gösterdiği tepki ve doğruluğu bulgular ve tartışma başlığında analiz edilmiştir. Sonuçlar ve değerlendirme başlığı altında da yapılan çalışmanın eleştirel bakış açısıyla yorumlanmıştır.

## 2. Materyal ve metot

### 2. Material and method

#### 2.1. Ölçümleme yöntemi

##### 2.1. Measurement method

Elektrik sayaçlarının en temel işlevi, kullanıcıların elektrik enerjisi tüketimindeki aktif ve reaktif güç değerlerini zamanla ilişkilendirerek kaydetmektir. Bu bağlamda, en temelde akım ve gerilim değerleri ölçülünerek ilgili tüm tüketim verileri türetilmektedir. Elektrik sayaçlarında akım ve gerilim ölçümü Eşitlik (1) ve (2) kullanılarak hesaplanmaktadır (Karaman vd., 2021).

$$V_{rms} = K_v \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N v(n)^2}{N}} \quad (1)$$

$$I_{rms} = K_i \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N i(n)^2}{N}} \quad (2)$$

Buradaki parametreler;

$V_{rms}$  : Etkin gerilim değeri

$K_v$  : Gerilim kazanç çarpanı

$I_{rms}$  : Etkin akım değeri

$K_i$  : Akım kazanç çarpanı

$N$  : Saniyede örneklenen sinyal sayısı

Aktif ve reaktif güç değerleri ise, ölçülünen akım ve gerilim sinyallerinden faydalanarak hesaplanmaktadır (Karaman vd., 2021).

$$P_{act} = K_p \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N v(n) \cdot i(n)}{N}} \quad (3)$$

$$P_{react} = K_p \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N v_{90^\circ}(n) \cdot i(n)}{N}} \quad (4)$$

Buradaki parametreler;

$P_{act}$  : Aktif güç değeri

$K_p$  : Güç kazanç çarpanı

$P_{react}$  : Reaktif güç değeri

$N$  : Saniyede örneklenen sinyal sayısı

$v_{90^\circ}$  : Örnekleme anındaki gerilimin, 90 derece faz farkının olduğu değeri

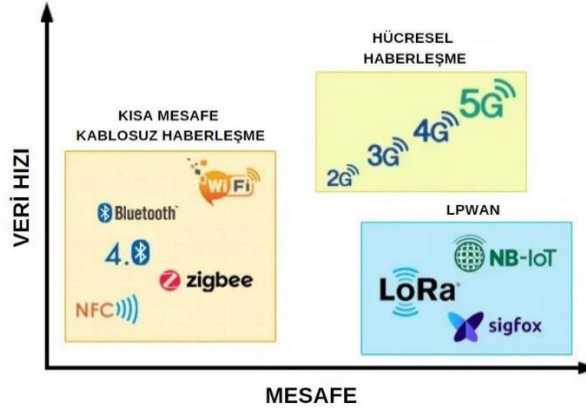
## 2.2. Haberleşme yöntemi

### 2.2. Communication method

Akıllı elektrik şebekelerinin haberleşme altyapısında verilerin iletimi kablolu ya da kablosuz olarak gerçekleşmektedir. Kablolu haberleşme tekniğinde iletim hattı olarak elektrik kablosu, koaksiyel kablolar ve fiber-optik kablolar kullanılırken, kablosuz iletişim tekniğinde hava ve uzay ortamı kullanılmaktadır (Folasade vd., 2021). Akıllı elektrik şebekelerinde kullanılan kablolu haberleşme sistemlerinde PLC, PSTN, fiber-optik ve ethernet yer alırken, kablosuz haberleşme sistemlerinde ise Wi-Fi, Bluetooth, LoRa RF, ZigBee ve GSM/GPRS gibi haberleşme yöntemleri yer almaktadır (Fredrik vd., 2021). Her haberleşme tekniğinin iletim şeklinde avantaj ve dezavantajlar bulunmaktadır. Haberleşme tekniklerinden hangisinin kullanılacağı belirlenirken maliyet, performans, güvenilirlik ve sürdürülebilirlik faktörleri iyi analiz edilmelidir.

Wi-Fi haberleşmesi lisans gerektirmeyen frekanslarda çalışması, diğer kablosuz çözümlere kıyasla daha ucuz maliyetli ve kolay kurulumla sahip olması sistemin avantajları iken, veri iletim hızının düşük olması, güvenlik konusunda problemlerin olması ve diğer kablosuz cihazlarla birlikte birbirinin iletişimini engelleyebilmesi sistemin dezavantajıdır (Win, 2017). Wi-Fi haberleşmesinde veri iletim hızı 2 Gbps'a kadar çıkabilmektedir. Ancak geliştirilen sistemin donanım performansı gereği iletim hızı 2 Mbps'a kadar sağlanmaktadır.

LoRa haberleşmesi veri iletimi için elektromanyetik dalgaları kullanan, uzak mesafelere güvenilir haberleşme sağlayan ve düşük güç tüketimi ile ön plana çıkan radyo frekansı iletişim teknolojisidir. Düşük maliyet, yüksek hassasiyet, elektriksel gürültülere karşı dayanıklı olması ve uzun menzilli haberleşmede iyi performans sergilemesi sistemin avantajları iken, iletişim hızının düşük olması sistemin dezavantajıdır. LoRa haberleşmesinde veri iletim hızı 500 kbps'a kadar çıkabilmektedir. Ancak, geliştirilen sistemin donanım performansı gereği iletim hızı 2.4kbps'a kadar sağlanmaktadır (Anup vd., 2021). Haberleşme tekniklerinin performans karşılaştırmasının grafiksel gösterimi Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Haberleşme tekniklerinin performans karşılaştırması

Figure 2. Performance comparison of communication techniques

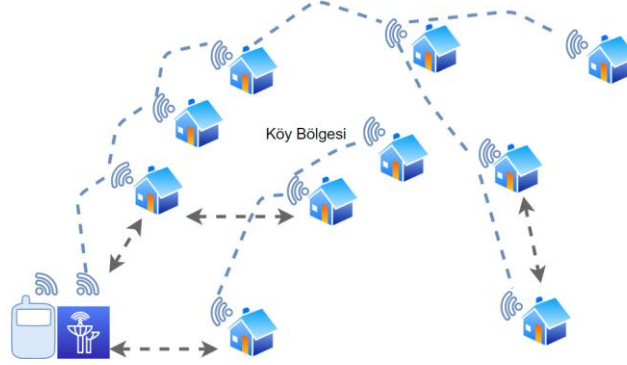
Bu çalışmada, veri iletimi için Wi-Fi ile LoRa RF haberleşmesi kullanılmıştır. Bu çalışmanın kapsamında Wi-Fi haberleşmesinin tercih edilmesinin ana nedeni; sistem entegrasyonu için düşük maliyetli ve kolay olmasının yanı sıra iletilecek verilerin noktadan noktaya iletişimde bulut hizmetlerinin sağladığı avantajlar ile birlikte sistem performansının daha verimli kullanılmasıdır. LoRa RF haberleşme tercihi ise, internet erişiminin olmadığı coğrafi bölgelerde elektrik sayaçlarının ölçüm verilerini uzaktan okumak için alternatif bir haberleşme çözümü olmasıdır. Böylece, sistemin kurulum aşamasında oluşabilecek farklı koşullar durumunda entegrasyon problemi olmayacaktır.

## 2.3. Gateway bağlantısı

### 2.3. Gateway connection

LoRa haberleşmesi geniş alanlarda uzun menzil kullanımı avantajına sahiptir. Ancak, bu haberleşme yönteminde doğrudan internete veya merkezi bir sunucuya bağlantısı yoktur. Bu bağlamda, elektrik

sayaçlarının topladığı tüketim verilerini internet veya bir ağ sunucuna iletmesi için Gateway bağlantısına ihtiyaç duyulmaktadır. Böylece, LoRa cihazlarından gelen verilerin dış dünya ile etkileşimi sağlanmış olur. Gateway birden fazla LoRa cihazından gelen elektriksel sinyalleri alabilmenin yanı sıra ağdaki diğer cihazlara iletmek için bu verileri işleyebilir. Bu avantaj ile birlikte haberleşmenin kapsama bölgesi planlamasında optimizasyon yapılmıştır. LoRa haberleşmesinde merkezi bir görev üstlenen Gateway, geniş alanlarda veri toplama ve iletişim için etkili bir çözüm sunar (Adrian vd., 2019). Gateway kullanımının operasyonel gösterimi Şekil 3’de verilmiştir.

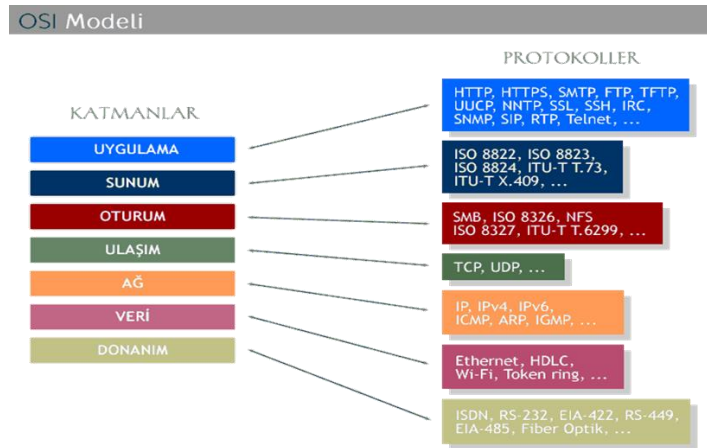


**Şekil 3.** Gateway operasyonel gösterimi  
**Figure 3.** Operational presentation of gateway

## 2.4. İnternet ağı katmanları

### 2.4. Internet network layers

Haberleşme sisteminde bahsi geçen tüm teknikler verilerin bir noktadan başka bir noktaya ulaşmasından sorumludur. Haberleşme sisteminin performansı değerlendirilirken, verilerin güvenliği ve bütünlüğünün sağlanması da sistemin tasarımında düşünülmelidir. Bunun içinde bir network sistem yapısı ağa dahil edilme ihtiyacı duyulmaktadır. Bu network sistem yapısı da OSI katmanları ile ifade edilmektedir. OSI standardı iki bilgisayar arasındaki iletişimin nasıl olacağını tanımlamaktır. Gerek ağ içinde gerek ağ dışında veri iletişiminin gerçekleşmesi mutlaka her katmandan geçmesi gerekir (Ahmad, 2017). Uygulama, sunum, oturum, ulaşım, ağ, veri ve donanım olmak üzere yedi adet katmandan oluşmaktadır. Wi-Fi haberleşmesinde önemli bir yeri olan OSI katmanlarının blok diyagramı Şekil 4’de gösterilmiştir.



**Şekil 4.** OSI katmanları  
**Figure 4.** OSI layers

Veri katmanı, cihazlar arası haberleşmenin fiziksel olarak gerçekleştiği katmandır. Bu çalışmada kullanılan ESP8266 internet modülü, Wi-Fi haberleşme bağlantısını sağlamaktadır. Cihazlar fiziksel olarak birbirlerine bağlı olsalar da (Ethernet ve kablosuz haberleşme teknikleri) verinin gönderileceği hedef belirlenmediği için birbirleri arasında haberleşme gerçekleşmez.

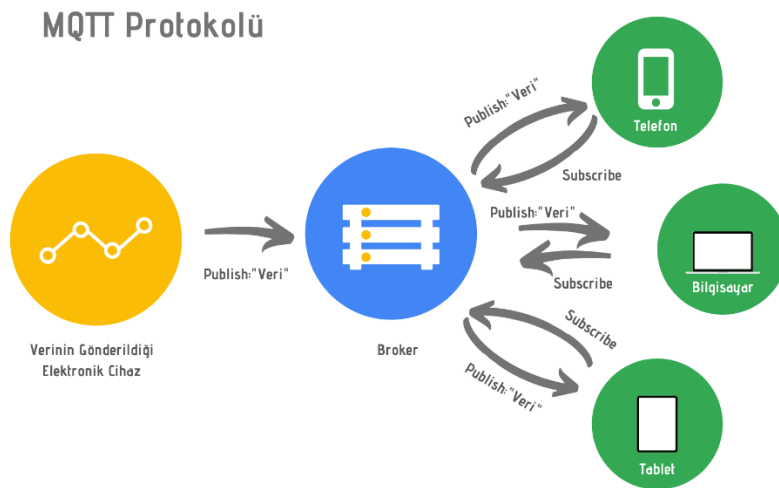


Ağ katmanı, veri paketlerinin farklı bir ağa gönderilmesi için yönlendiricilerinin belirlendiği kısımdır. Verilerin paket şeklinde iletiildiği bu katmanda, ağa bağlı olan cihazlara DHCP tarafından otomatik bir IP adresi tanımlanmaktadır. Hem gönderici hem de alıcı tarafa tanımlanan IP adresleriyle birlikte ağın adreslenmesi ve kontrolü sağlanmaktadır.

Ulaşım katmanı, verinin hedefe uçtan uca iletilmesinden sorumludur. TCP protokolünün yer aldığı bu katmanda, verilerin parçalanarak, şeffaf ve güvenli olarak iletilmektedir. Veriler parçalandığında iletim sırasında birtakım bozunuma uğrayabilir. TCP protokolü bu noktada, haberleşmenin başlangıç ve bitiş zamanlarında bağlı istekleri üzerinden kontrol ederek tüm paketlerin düzenli iletilmesini sağlamaktadır.

Uygulama katmanı, bilgisayar uygulaması ile ağ servisi arasındaki iletişimin sağlandığı katmandır. Kullanıcıların isteklerini karşılayacak olan haberleşme protokolleri bu katmanda çalıştırılmaktadır. HTTP, HTTPS, SSH, TELNET, FTP, MQTT gibi protokoller bu katmanda yer alır.

Bu çalışmada, uygulama katmanında yer alan MQTT haberleşme protokolü kullanılmıştır. MQTT haberleşme protokolü, küçük cihazlar için düşük bant genişliği sunan makineden makineye haberleşme sağlayan telemetri mesajlaşma protokolüdür. IoT cihazları için popüler kullanıma sahip olan bu protokol yayımla/abone ol ilkesi ile çalışmaktadır. Pil gücünün yüksek olduğu uygulamalar için avantajlı kullanıma sahiptir (MQTT, 2022). Çok boyutlu ve karmaşık yapıları verilerin ayrıştırılarak iletiildiği bu protokolde kimlik doğrulama, yetkilendirme, abonelikler, cevapsız çağrılar ve aynı anda milyonlarca istemci hareketleri gibi tüm haberleşme süreci broker üzerinden gerçekleşmektedir (The HiveMQ Team, 2022). MQTT haberleşme protokolünün genel blok diyagramı Şekil 5’de gösterilmiştir.

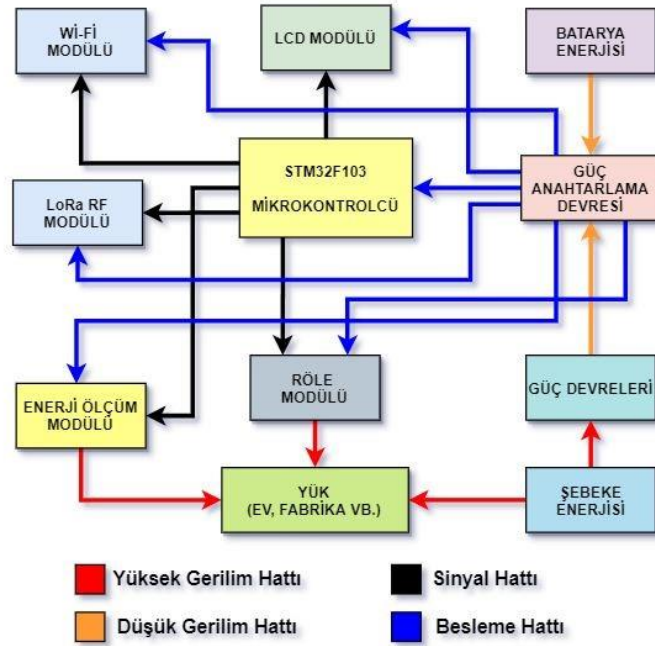


**Şekil 5.** MQTT protokolü blok diyagramı  
**Figure 5.** MQTT protocol block diagram

## 2.5. Deneysel çalışmalar

### 2.5. Experimental studies

Bu çalışmada tek fazlı akıllı elektrik sayacı tasarlanmıştır. Elektronik sistem mimarisi kontrolcü, ölçüm, güç, anahtarlama, haberleşme ve gösterge alt sistemlerinden oluşmaktadır. Her bir alt sistem belirli bir görev için hizmet etmekte ve birlikte tüm sistemi oluşturmaktadır. Sistemin genel blok diyagram gösterimi Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 6. Sistemin blok diyagramı  
Figure 6. Block diagram of the system

Ölçüm katmanında, PZEM-004T enerji ölçümleme modülü yer almaktadır. Bu modül 0-100 A akım ve 80-260 V gerilim ölçümleme aralığına sahiptir. Elektrik enerjisi tüketicilerinin faturalarına direkt olarak etkileyecek olan bu katmanda en temelde akım ve gerilim ölçümlerinden yararlanılarak güç hesaplama prensibine dayanır. Ölçümler sonucu elde edilen güç değerleri, zamana bağımlı olarak toplanarak toplam enerji tüketimini oluşturmaktadır. Bu tüketim değeri birimi kWh cinsindedir. Elektrik enerjisi, toplam tüketim üzerinden tüketicilere faturalandırılmaktadır.

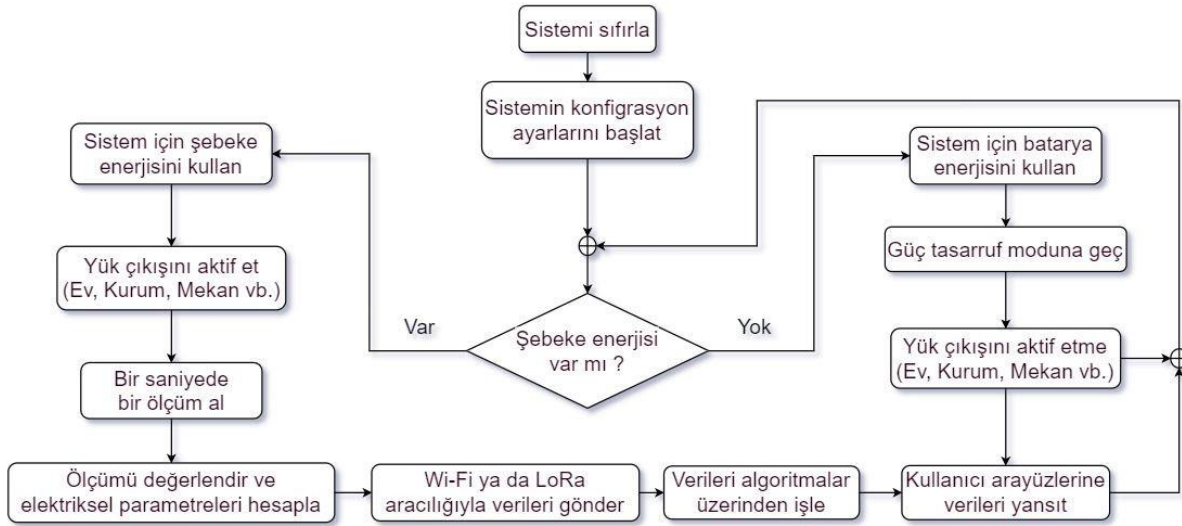
Elektrik şebekesine bağlanan PZEM-004T enerji ölçüm modülü bünyesinde yer alan akım ve gerilim sensör devreleri ile anlık olarak ölçümler almaktadır. Temel iki parametreye ilave olarak faz açısı değerini de hesaplamasıyla birlikte aktif güç ve reaktif güç değerlerini hesaplamaktadır. Tüm elektriksel ölçüm verileri, kontrolcü sisteminde yer alan STM32F103 mikrokontrolçüsüne UART haberleşme protokolü üzerinden aktarılmaktadır.

Kontrolcü katmanında, STM32F103 mikrokontrolçüsü yer almaktadır. Ölçümleme verilerinin alınması, verilerin işlenmesi, elektriksel parametreleri LCD üzerinden görüntülenmesi, güç anahtarlama, LoRa RF ve Wi-Fi haberleşmesi ile verilerin iletilmesi gibi cihazın tüm fonksiyonlarını yöneten algoritma bu mikrokontrolcü içerisindeki yazılımda yer almaktadır.

Sistem yazılımı, STM32Cube IDE programı üzerinden C programlama dilinde tasarlanmıştır. Sistem yazılımı içerisinde, aktif ve reaktif güç değerleri Timer Interrupt fonksiyonu içerisinde her saniyede kümülatif olacak biçimde toplam tüketim değişkeninde toplanır. Sistemin algoritma akış diyagramı Şekil 7'de verilmiştir.

Anahtarlama katmanında, röle modülü yer almaktadır. Elektrik şebeke hatlarında oluşabilecek tehlikeli gerilim seviyelerinde, sistem otomatik olarak röle modülü üzerinden çıkış hattının enerjisini kesmektedir. Ayrıca, olası olağanüstü durumlarda ya da istek dahilinde kullanıcılar enerjiyi uzaktan kapatabilmektedir.

Güç katmanında, anahtarlama devresi ve güç kaynağı modülü yer almaktadır. Sistem içerisinde yer alan tüm elektronik ekipmanların enerji besleme gereksinimi bu katman tarafından karşılanmaktadır. Sistem şebeke enerjisi olduğu zaman beslemeyi buradan alırken, şebeke enerjisi olmadığı zaman beslemeyi pil devresinden almaktadır. Her iki durumda da enerji besleme girişi regülatör katından geçirilerek sisteme dağıtılmaktadır.

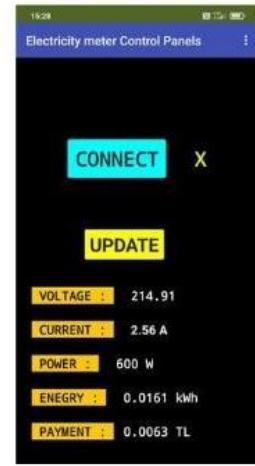


**Şekil 7.** Sistemin algoritma akış diyagramı  
**Figure 7.** Algorithm flow diagram of the system

Haberleşme katmanında, ESP8266 Wi-Fi ve LoRa RF modülleri yer almaktadır. Bu katmanda internet altyapısının olduğu coğrafi bölgelerde Wi-Fi haberleşmesi kullanılırken, olmadığı bölgelerde ise RF haberleşmesi kullanılarak verilerin anlık olarak uzaktan okunması sağlanmıştır. Sistem içerisinde yer alan tüketim verileri MQTT haberleşme protokolü üzerinden brokera (Shifter.io) yayınlamaktadır. Kullanıcılar hem mobil uygulama hem de web sunucusu üzerinden tüketim verilerini takip edebilmektedir. Sistemin kullanıcı panelleri Şekil 8.a ve 8.b’de verilmiştir.



(a)



(b)

**Şekil 8.** (a) Web arayüzü (b) mobil uygulama  
**Figure 8.** (a) Web application interface (b) mobile application interface

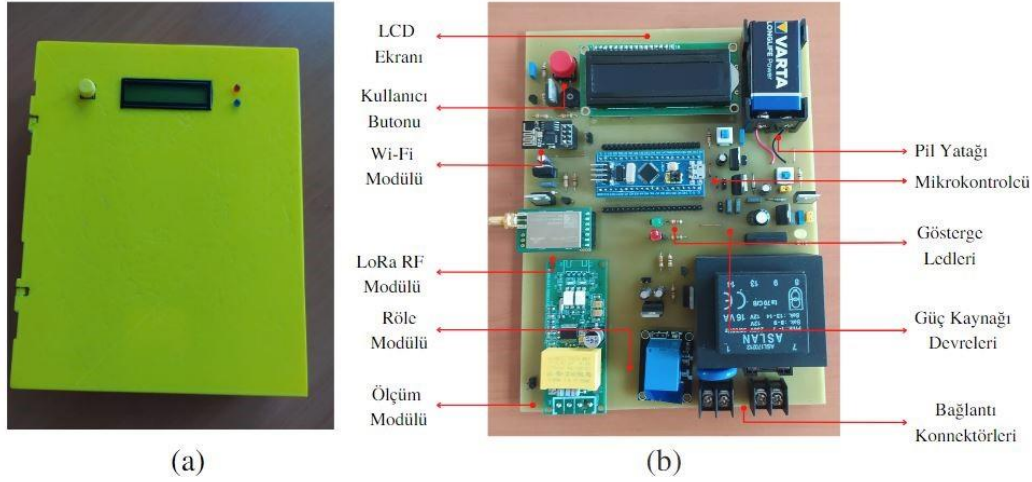
Gösterge katmanında, 16x2 LCD modülü yer almaktadır. Elektronik sistemin kullanıcılar ile etkileşimde bulunmasında bu katman önemli bir görev üstlenmektedir. Sistem tarafından ölçümlenen ve anlamlı bilgilere dönüştürülen veriler, kullanıcılara gösterge ekranları tarafından gösterilmektedir.

Bu çalışmada, tüm sistemi çalıştıracak olan gömülü sistem yazılımı özgün olarak tasarlanmıştır. Güç takip edilebilirliğini artırması, sistem kesintilerinin daha hızlı tespit edilebilirliği, güç dengesizlikleri olduğunda korumalı entegrasyonları aktifliği gibi özellikler kazandırılmıştır. Böylece, maddi kayıpların ve zararların



önüne geçilmesi sağlanmıştır. Ayrıca, internet erişiminin olmadığı koşullarda alternatif bir çözüm olarak RF haberleşmesi ile sistem entegrasyon problemi çözümlenmiştir.

Çalışmanın genel kapsamı incelendiğinde, yeni nesil elektrik sayaçlarının geliştirilmesinden, iletişim, işlemsel yönetim sistemlerinin inşasına ve istikrarlı operasyonuna kadar birçok hedefi kapsamaktadır. Uygulaması gerçekleştirilen cihaz Şekil 9’da verilmiştir.



**Şekil 9.** (a) Cihazın dış ve (b) iç görünümü  
**Figure 9.** (a) External view of the device (b) internal view of the device

### 3. Bulgular ve tartışma

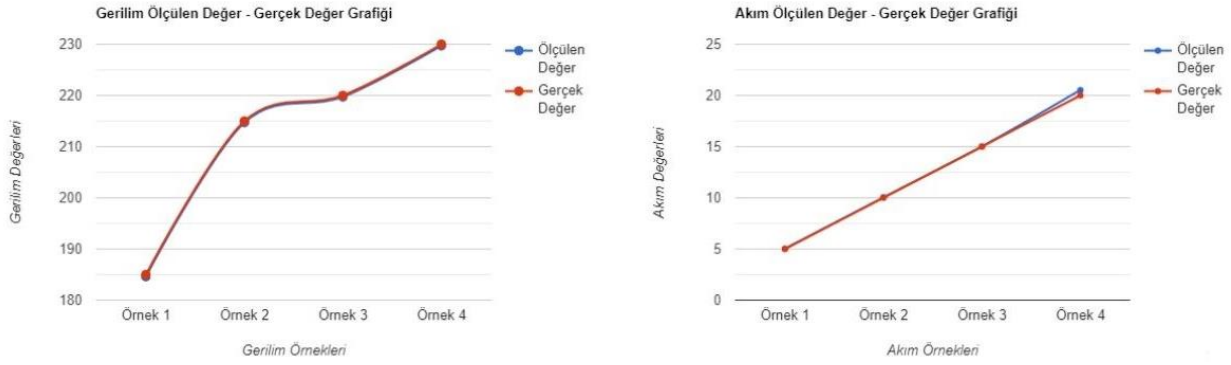
#### 3. Findings and discussion

Akıllı elektrik sayacının deneysel ortamda testini yapabilmek için enerji kalibrasyon cihazı kullanılmıştır. Bu çalışmada, sayacın farklı ölçüm değerlerine karşı gösterdiği tepki ve doğruluğu test edebilmek için enerji kalibrasyon cihazının harcadığı gücü, panel üzerinden manuel olarak artırılarak sayacın ölçüm doğruluğu gözlemlenmiştir. Cihazın testlerinde, gerilim ve akım skalasında yer alan farklı değerler üzerinden sistemin performansı incelenmiştir. Cihazın ölçüm değerlerini kıyaslayabilmek adına referans olarak enerji kalibrasyon cihazının ölçüm paneli kullanılmıştır. Elektrik sayacı ile enerji kalibrasyon cihazı ölçümlerinin arasındaki fark, hata payı olarak karşımıza çıkmaktadır. Kademeli olarak test edilen cihazın ölçüm tablosu Tablo 1’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Gerilim ve akım için ölçülen değer ve gerçek değer için ölçüm tablosu  
**Table 1.** Measurement table for measured value and actual value for voltage and current

Ölçülen değer	Gerilim		Ölçülen değer	Akım	
	Gerçek değer	Doğruluk		Gerçek değer	Doğruluk
184.6 V	185.0 V	%99.78	5.029 A	5.0 A	%99.42
214.7 V	215.0 V	%99.86	10.048 A	10.0 A	%99.52
219.7 V	220.0 V	%99.86	15.022 A	15.0 A	%99.85
229.7 V	230.0 V	%99.86	20.18 A	20.0 A	%99.10

Tablo 1’den görüldüğü üzere, her gerilim ve akım değeri için ölçüm doğruluğu yaklaşık olarak %99.65 olarak belirlenmiştir. Ölçümlenen değer ile referans değeri birbirine yakın olduğu ve arasındaki farkın ihmal edilebilir boyutta olduğu gözlemlenmiştir. Cihazın ölçüm doğruluk grafiği Şekil 10’da verilmiştir.



**Şekil 10.** Cihazın ölçüm doğruluk grafiği

**Figure 10.** Measurement accuracy chart of the device

Elektrik sayaç cihazlarının performansını değerlendirilirken ölçüm doğruluğu belirleyici etkenler arasındadır. Cihazın düşük hata payları ile uzun yıllar kararlı ölçümler yapabilmesi gerekmektedir. Bunun içinde profesyonel laboratuvarlarda, gelişmiş Ar-Ge çalışmaları sonucunda piyasa standartlarını karşılayan bir ürün ortaya konulmaktadır. Sayacın ölçülediği tüketim verileri, gerçek zamanlı olarak hem LCD ekranı göstergesine hem de mobil uygulama arayüzüne internet aracılığıyla aktarılmıştır. Ayrıca, mobil uygulama arayüzü ekranındaki buton ile enerjinin açma-kapatma testleri gerçekleştirilmiştir. Laboratuvar ortamında test edilen cihazın görüntüsü Şekil 11’de verilmiştir.



**Şekil 11.** Cihazın laboratuvar ortamında test görüntüsü

**Figure 11.** Test image of the device in laboratory environment

Çalışmanın uygulanabilirlik boyutu incelendiğinde hem maliyetlerin indirgenmesi hem en optimum yaklaşım tarzı olarak şu anda hanelerin çoğunda takılı olan sayaçlara entegre edilebilir bir IoT (Internet of Things) cihazına dönüştürülebilir. Eğer bahsi geçen tüm özelliklerin tek bir sistem altında olması isteniyorsa proje yerleşik hayatta kullanılan cihazların yenileri ile değiştirilerek mümkün olabilir. Her iki yöntem de akıllı elektrik şebekeleri ve ev sistemleri otomasyonuna kolayca entegre olarak bu sistemlere hizmet edebilirler.

#### 4. Sonuç ve değerlendirme

##### 4. Conclusion and evaluation

Elektrik enerjisi, kaynakların sınırlı olması ve enerjiye olan talebin her geçen gün artması nedeniyle mevcut kaynakların efektif biçimde kullanılması gerekmektedir. Elektrik enerjisinin bilinçli kullanılmaması

üretimden tüketime kadar olan tüm süreçte birçok kayıplara uğramaktadır. Enerjinin verimli kullanılması için kayıpların iyileştirilmesi gerekmektedir. Tüm bu süreçlerde yaşanan kayıpların önüne geçilmesi akıllı elektrik şebekelerinin ana hedefidir.

Bu çalışmada, elektrik enerjisi kullanan tüketicilerin tüketim bilgilerini anlık olarak izleyebilmesi için bir akıllı elektrik sayacı tasarlanmıştır. Akıllı elektrik sayacı tarafından ölçümlenen tüm veriler, internet erişimi olan coğrafi bölgelere MQTT haberleşme protokolü üzerinden Shifter.io Cloud sunucusuna, internet erişimi olmayan bölgelere ise LoRa RF haberleşmesi ile veri merkezine kablosuz olarak aktarılmıştır. Ayrıca, kullanıcıların cep telefonlarından verileri uzaktan okuyabilmesi ve enerjiyi kontrol edebilmeleri için App Inventor programında bir mobil uygulama arayüzü geliştirilmiştir. Elektrik enerjisi tüketen kullanıcıların tüketim bilgilerini anlık olarak takip edebilmeleri ve analiz edebilmeleri sağlanmıştır. Böylece, enerjinin tasarruflu tüketilmesi hakkında bilinç ve alışkanlık kazandırılmasının yanı sıra enerji üretici ya da dağıtıcı firmalarına istatistiksel veriler toplanarak gelecek adına planlama yapılmasında katkı sunulmuştur. Ölçülen değerlerle mevcut değerler arasında  $> \%99$  oranında uyum gözlenmiştir. Tüm sistemi çalıştıracak olan donanım ve gömülü sistem yazılımı özgün olarak tasarlanmıştır. Bu çalışmada sunulan yöntem ile akıllı elektrik şebekelerinin en önemli bileşeni olan akıllı elektrik sayacı uygulamasına bir örnek teşkil etmektedir. Ayrıca, proje kapsamında LoRa RF haberleşme altyapısı kurulumu için elektrik sayaçların aynı zamanda modem olarak da kullanılabilmesi sunulmuştur. Böylece, geniş alanlarda veri toplama ve iletişim için kapsama bölgesi planlamasında optimizasyon yapılmıştır.

### **Teşekkür**

#### *Acknowledgement*

Bu çalışma TÜBİTAK kurumunun 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı tarafından desteklenmiştir.

### **Yazar katkısı**

#### *Author contribution*

Araştırmacılarından Mertcan NANE, proje fikrinin oluşturulması, elektronik sistem tasarımı, donanım tasarımı, Ar-Ge sürecindeki tüm saha testlerinin yapılması ve makalenin düzenlenmesini gerçekleştirmiştir. Halil GÖK ve Ömür AKYAZI, proje fikrinin geliştirilmesi, gömülü sistem yazılımının hazırlanması, Ar-Ge sürecinin planlaması ve makalenin ilgili tablo ve görsellerin hazırlanmasında yer almıştır. Canan AKSOY, literatür taraması, makale yazımının düzenlenmesi, ilgili tablo verilerinin yorumlanmasında katkıda bulunmuştur.

### **Etik beyanı**

#### *Declaration of ethical code*

Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.

### **Çıkar çatışması beyanı**

#### *Conflicts of interest*

Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

### **Kaynaklar**

#### *References*

Adrian, I.P., Alexandru, L., Eugen, C. (2019). LoRaWAN gateway: design, implementation and testing in real environment. *2019 IEEE 25th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME)*

Ahmad, F. (2021). Computer networking layers based on the OSI model. *Test Engineering and Management*, 83, 6485-6495.

- Akkaya, O. S., & Soy, H. (2021). Hardware design of single-phase smart electricity meter based on multiple wireless connectivity technologies. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 32, 332-338. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1040829>
- Aktaş, A. & Kırçıçek, Y. (2021). Solar hybrid systems for smart grids. *ScienceDirect*, 153-178. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-88499-0.00008-2>
- Anup, M., Yaju, R., Ashish, S., Ajay, S., Anup, T., Francisco, G., Petr, K. & Seokjoo, S. (2021) Evaluation of a LoRa mesh network for smart metering in rural locations. *Electronics*, 10(6), 751. <https://doi.org/10.3390/electronics10060751>
- Bayindir, R., Colak, I., Fulli, G., & Demirtas, K. (2016). Smart grid technologies and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 499-516. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.002>
- Dileep, G. (2020). A survey on smart grid technologies and applications. *Renewable Energy*, 146, 2589-2625. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.092>
- Düzgün, B. (2018). Türkiye elektrik iletim ve dağıtım şebekesinin enerji verimliliğinin değerlendirilmesi ve 2023 projeksiyonları. *Politeknik Dergisi*, 21(3), 621-632. <https://doi.org/10.2339/politeknik.389604>
- Eldem, M.O. (2017). Akıllı şebekeler. *TMMOB EMO Ankara Şubesi Haber Bülteni 2017/2*, 6-9.
- Folasade, D., Sunday, O., Akinlolu, P. & Oluwafemi, S. (2021). Communication network simulation for smart metering applications: a review. *Journal of Innovative Science and Engineering*, 5(2), 101-128. <https://doi.org/10.38088/jise.835725>
- Fredrik, E.A., Yun, A. & Michael, C. (2021). Communication technologies for smart grid: a comprehensive survey. *Sensors*, 21(23), 8087. <https://doi.org/10.3390/s21238087>
- İlisu, F., Kolukısa Tarhan, A., Kavak, K. (2020). Akıllı şebeke uygunluk modelinin dünya çapındaki uyarlamaları ve türkiye için öneriler. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 13(2), 123-136. <https://doi.org/10.17671/gazibtd.533221>
- J.W. Fourie & J.E. Calmeyer. (2004). A statistical method to minimize electrical energy losses in a local electricity distribution network. *IEEE AFRICON. 7th Africon Conference in Africa*, 667-673.
- Jixuan, Z., Li, L. & David, W.G. (2013). Smart meters in smart grid: an overview. *IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*, 57-64. <https://doi.org/10.1109/GreenTech.2013.17>
- Karaman, B., Taşkın, S. & Tokay, M. (2021). Gerçek zamanlı enerji izleme ve tüketici farkındalığı için LabVIEW™ programı ile otomatik sayaç okuma. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 33(2), 225-232. <https://doi.org/10.7240/jeps.759782>
- Kocaman, B. (2018). Teknik olmayan enerji kayıplarının azaltılmasında PLC sayaçlarının önemi. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2), 220-230. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.420198>
- Martins, P., Oleskovicz, M. & Silva Pessoa, A. L. (2019). A Survey on smart grids: concerns, advances, and trends. *2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference- Latin America (ISGT Latin America)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ISGT-LA.2019.8895296>
- MQTT, (2022). *The standart for IoT messaging*. <https://mqtt.org/>
- Önen, A., Kuran, M.Ş. (2015). Günümüzün ve geleceğin elektrik şebekeleri, *Bilim ve Teknik Dergisi*, 54-57.
- Salman, S. K. (2019). Evolution of conventional power systems to smart grids. *2019 54th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/UPEC.2019.8893444>
- The HiveMQ Team, (2022). MQTT client and broker and MQTT server and connection establishment explained-MQTT essentials: part 3. <https://www.hivemq.com/blog/mqtt-essentials-part-3-client-broker-connection-establishment/>
- Win, H. (2017). Implementation of WiFi-based single phase smart meter for Internet of Things (IoT). *5th International Electrical Engineering Congress*, 8(10).

Xudong, H., Jian W., Jiqiang L., Enze Y., Kailun W., & Zhen H. (2021). Smart grid nontechnical loss detection based on power gateway consortium blockchain, *Hindawi Security and Communication Networks*, 2, 20. <https://doi.org/10.1155/2021/9501572>