**T.C.**
**SAKARYA ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# NESNELERİN İNTERNETİ İÇİN HAFİF SİKLET KRİPTOLOJİ ALGORİTMALARINA DAYALI GÜVENLİ HABERLEŞME MODELİ TASARIMI

**DOKTORA TEZİ**

**Uras PANAHI**

**Bilgisayar ve Bilişim Mühendisliği**

**ARALIK 2022**

**T.C.**
**SAKARYA ÜNİVERSİTESİ**
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

# NESNELERİN İNTERNETİ İÇİN HAFİF SİKLET KRİPTOLOJİ ALGORİTMALARINA DAYALI GÜVENLİ HABERLEŞME MODELİ TASARIMI

**DOKTORA TEZİ**

**Uras PANAHI**

**Bilgisayar ve Bilişim Mühendisliği**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Cüneyt BAYILMIŞ**

**ARALIK 2022**

Uras PANAHI tarafından hazırlanan "NESNELERİN İNTERNETİ İÇİN HAFİF SİKLET KRİPTOLOJİ ALGORİTMALARINA DAYALI GÜVENLİ HABERLEŞME MODELİ TASARIMI" adlı tez çalışması 07.12.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar ve Bilişim Mühendisliği Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

**Tez Jürisi**

**Jüri Başkanı :** **Prof. Dr. Cüneyt BAYILMIŞ** (Danışman) .....
Sakarya Üniversitesi

**Jüri Üyesi :** **Doç. Dr. Sezgin KAÇAR** …….....
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

**Jüri Üyesi :** **Dr. Öğr. Üyesi Abdullah SEVİN** .....
Sakarya Üniversitesi

**Jüri Üyesi :** **Dr. Öğr. Üyesi Murat İSKEFİYELİ** .....
Sakarya Üniversitesi

**Jüri Üyesi :** **Dr. Öğr. Üyesi Zafer ALBAYRAK** .....
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

## ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum "NESNELERİN İNTERNETİ İÇİN HAFİF SİKLET KRİPTOLOJİ ALGORİTMALARINA DAYALI GÜVENLİ HABERLEŞME MODELİ TASARIMI" başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi'nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim. (25/10/2022).

Uras PANAHI

***Aileme, eşime ve öğlum Kaan'a***

**TEŞEKKÜR**

Doktora eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Prof. Dr. Cüneyt BAYILMIŞ'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tez çalışmasının gerçekleştirilmesi için özellikle maddi ve manevi desteklerini üzerimden eksik etmeyen değerli eşim ile aileme ve emeği geçen herkese teşekkür ederim.

Uras PANAHI

**İÇİNDEKİLER**

**Sayfa**

## KISALTMALAR

**AES** : Advanced Encryption System
**AMQP** : Advanced Message Queuing Protocol
**BER** : Bit Error Rate
**CLBCSF** : Cross-Layer Based Comprehensive Security Framework
**CLS-FTCM** : Cross-Layer Security-Based Fuzzy Trust Calculation Mechanism
**CLS-IDS** : Cross Layer Security Based Intrusion Detection System
**CoAP** : Constrained Application Protocol
**DDS** : Data Distribution Service
**DECRSA** : Dynamic EC-RSA
**DES** : Data Encryption Standard
**DoS** : Denial of Service
**ECC** : Eliptic-Curve Cryptography
**FS-SSL** : Four-Stage Security Service Level
**GB** : Gigabyte
**GHz** : Gigahertz
**IoT** : Internet of Things
**ISA** : Intelligent Security Agent
**KAA** : Kablosuz Algılayıcı Ağlar
**KB** : Kilobyte
**KP/CP-ABE** : Key/Ciphertext Policy-Attribute Based Encryption
**LMDH** : Logistic Map Diffie Hellman
**LPM** : Low Power Mod
**LwM2M** : Lightweight M2M Standard
**LWSDAS** : Lightweight Secure Data Authentication Scheme
**mW** : milliwatt
**mA** : Milliampere
**M2M** : Machine-to-Machine
**MOM** : Message-Oriented Middleware
**MQTT** : Message Queuing Telemetry Transport
**MQTT-SN** : MQ Telemetry Transport for Sensor Networks

**OPC UA** : OPC Unified Architecture
**OWASP** : Open Web Application Security Project
**PKC** : Public Key Cryptography
**PRC** : Routed Remote Procedure Calls
**QoS** : Quality of Service
**RC** : Rivest Cipher
**RSA** : Rivest–Shamir–Adleman
**SPN** : Substitution-Permutation Network
**SSO** : Social Spider Optimization
**STOMP** : Simple (Or Streaming) Text Orientated Messaging Protocol
**TTMP** : Text Oriented Messaging Protocol
**UDGM** : Unit Disk Graph Medium
**WAMP** : Web Application Messaging Protocol
**XMPP** : Extensible Messaging and Presence Protocol
**YTA** : Yazılım Tanımlı Ağ

## SİMGELER

| | |
|---|---|
| $N_B$ | : Blok boyutu |
| $T_e$ | : Şifreleme çalıştırma zamanı |
| $T_d$ | : Şifre çözme çalıştırma zamanı |
| $N_d$ | : Teslim edilen paketlerin sayısı |
| **P** | : Paket boyutu |
| **I** | : Mevcut akım [Birim] |
| **T** | : Zaman |
| **Q** | : Yük |
| **V** | : Voltaj [Birim] |
| **E** | : Enerji tüketimini [Birim] |

## TABLO LİSTESİ

**Sayfa**

## ŞEKİL LİSTESİ

**Sayfa**

# NESNELERİN İNTERNETİ İÇİN HAFİF SİKLET KRİPTOLOJİ ALGORİTMALARINA DAYALI GÜVENLİ HABERLEŞME MODELİ TASARIMI

## ÖZET

Nesnelerin İnterneti, algılayıcılar, işleme yeteneği olan ve diğer cihazlarla (İnternet veya diğer şebekeler) veri alışverişi yapan teknolojilere sahip fiziksel nesneleri tanımlar. IoT ağların bir alt kümesi olan kablosuz algılayıcı ağları, verileri algılayan, toplayan ve ileten düğümlerden oluşur. Bu ağlardaki düğümler arasında algılanan ve aktarılan verilerin yüksek hacmi, verilerin güvenli ve el değmeden tutulmasını gerekli kılmaktadır. Bir IoT ağında düğümlerin kaynakları kısıtlı olduğundan, tipik şifreleme algoritmalarının uygulanması maliyetlidir ve verimli değildir. Birçok çözüm, kaynak kısıtlaması olan kablosuz algılayıcı ağlarının güvenlik taleplerini karşılar ve hafif siklet şifreler, uçtan uca güvenlik sağlamak için sofistike çözümlerdir. Bu tez çalışmanın amacı, kablosuz algılayıcı ağlar için uygulama türü, güvenlik düzeyi ve bit hata oranını dikkate alarak geliştirilmiş bir güvenli haberleşme mekanizması sunmaktır.

Tez çalışmasında, hafif siklet şifreleme çalışmalarında kullanılmak üzere; AES, PRESENT, LBlock, Skipjack, SIMON, XTEA, PRINCE, Piccolo, HIGHT ve RECTANGLE hafif siklet algoritmaların performans değerlerini şifreleme ve şifre çözme modlarında, bellek kullanımı (RAM ve ROM), enerji ve güç tüketimi, iş çıkarma oranı ve yürütme süresi gibi temel faktörler açısından test edilip ve karşılaştırılmıştır. Cihazlar arası veri iletimi bulut üzerinden şifreleme ve şifre çözme modları dahil olmak üzere gerçekleştirilmiştir. Performans analizi, IoT ortamında Raspberry Pi 3 ve Arduino Mega 2560 kullanarak yapılmıştır. Tez çalışmasında ayrica kablosuz algılayıcı ağlar için uygulama, güvenlik düzeyi ve bit hata oranını dikkate alarak geliştirilmiş bir güvenlik mekanizması sunulmuştur.

Kullanıcıya güvensiz veya güvenli haberleşme modlar arasında seçim yapma yeteneği vermek için Zigbee MAC başlığında ayrılmış çerçeve kontrol alanı bitleri kullanılmıştır. Belirli koşullar altında çapraz katmanlı etkileşim mekanizmasını kullanan ağ, AES'den özel kriterler nedeniyle mevcut diğer algoritmalara (RECTANGLE, Fantomas veya Camellia) geçebilir. AES performansı, seçilen algoritmaların performansı ile donanım (MICAz mote) ve simülatör (Riverbed Modeler) ortamlarında farklı senaryolar için, bellek kullanımı, iş çıkarma oranı, batarya tüketimi ve uçtan uca gecikme metrikleri baz alarak, ölçülmüş ve karşılaştırılmıştır. Ayrıca, MQTT-SN mesajlaşma protokolünde uçtan uca şifrelemek için MQTT-SN mesaj paketi formatında 3 rezerve MsgType bit alanı kullanılarak adı geçen 3 algoritma (RECTANGLE, Fantomas ve Camellia) MQTT-SN mesaj paketinde tanımlanıp ve performansları AES'e karşı kıyaslanmıştır. Performans değerlendirmeler, Zolertia Z1 algılayıcı ve Contiki (Cooja) simülatör üzerinden farklı senaryolar için bellek kullanımı, iş çıkama oranı, pil tüketimi ve uçtan uca gecikmeye dayalı olarak karşılaştırılmıştır.

## DESIGN OF A LIGHTWEIGHT CRYPTOGRAPHY-BASED SECURE COMMUNICATION MODEL FOR THE INTERNET OF THINGS

## SUMMARY

The Internet of Things describes physical objects with technologies that have sensors, processing capability, and exchange data with other devices (Through internet or other communication networks). Wireless sensor networks, as a subset of IoT networks, consist of nodes that sense, collect and transmit data. The high volume of data detected and transmitted among nodes in these networks makes it necessary to keep data secure and untouched. Since in an IoT network, nodes have restricted resources, implementing typical encryption algorithms are costly and inefficient. Many solutions meet the security demands of resource-constrained wireless sensor networks, and lightweight block ciphers are sophisticated solutions for providing end-to-end security. The aim of this thesis study is to present a secure communication mechanism developed for wireless sensor networks, taking the application type, security level and bit error rate into account.

To be used in light weight encryption studies; Performance values of AES, PRESENT, LBlock, Skipjack, SIMON, XTEA, PRINCE, Piccolo, HIGHT and RECTANGLE lightweight algorithms were tested and compared for both encryption and decryption modes in terms of key factors such as memory usage (RAM and ROM), energy and power consumption, throughput and execution time. In the selection of the mentioned algorithms, the criteria of block length, key sizes, popularity, internal structures and application possibilities on software environments were taken into consideration. Some algorithms, such as PRESENT, were hardware-oriented in the early versions, but were later developed to be installed on software platforms. Except for AES which has a block length of 128 bits, all other algorithms have 64 bits block lengths and a key size of 80 or 128 bits. Data transmission among devices has been done over the Dropbox cloud for encryption and decryption modes. Performance analysis was done using Raspberry Pi 3 and Arduino Mega 2560 in IoT environment.

An improved security mechanism is also presented for wireless sensor networks, taking the application, security level and bit error rate into account. Reserved frame control field bits are used in the Zigbee MAC header to give the user the ability to choose between insecure or secure communication modes. Under certain conditions, using the cross-layer interaction mechanism the network can switch from AES to other available algorithms (RECTANGLE, Fantomas, and Camellia) due to special criteria. Camellia is certified by the ISO/IEC organization and has comparable security levels to AES. RECTANGLE and Fantomas have high-speed software applications using the bit-slice technique, which makes them a good choice for online applications. AES performance was measured and compared with the performance of the selected algorithms based on memory usage, efficiency, battery consumption, and end-to-end latency for different scenarios in hardware (MICAz mote) and simulator (Riverbed Modeler) in Windows 10. In addition, to make an end-to-end encryption over MQTT-SN messaging protocol, using the 3 reserved MsgType bit fields in the MQTT-SN

message packet format, the three algorithms (RECTANGLE, Fantomas, and Camellia) were defined in the MQTT-SN message packet and their performances were compared against AES. Performance evaluations were conducted for different scenarios using the Zolertia Z1 mote and the Contiki (Cooja) simulator on Linux. The evaluations were based on metrics such as memory usage, throughput, battery consumption, and end-to-end latency.

# 1. GİRİŞ

Nesnelerin İnterneti (Internet of Things, IoT), insan müdahalesi olmadan verilerin algılanması ve toplanmasını, paylaşılmasını sağlayan, internete bağlı ve veri işleme yeteneğe sahip küresel bir ağdır. Cihazlar arasındaki iletişim, genellikle kısa menzili (Wi-Fi, bluetooth gibi) veya uzun menzilli (3G, 4G, LTE ve 5G gibi mobil ağlarla) ağlarla gerçekleşmektedir.

Teknoloji ilerlemeye devam ettikçe, her şey IoT'nin bir parçası haline getirilebilir. IoT cihazları farklı sektörlerde ve endüstride örneğin sağlık, ticaret, tüketici ve devlet uygulamalarında kullanılmaktadır [1]. Güvenilir ve birlikte çalışabilir bir IoT ekosistemi olmadan, ortaya çıkan IoT uygulamaları yüksek talebe ulaşamaz ve tüm potansiyellerini kaybedebilir. Bu kapsamda, sınırlı kaynaklara sahip IoT cihazlarının haberleşmesinin daha güvenli bir hale getirilmesi için var olan haberleşme tekniklerinin güçlenmesi, yeni uygulamalar ve güvenli haberleşme teknikleri geliştirilmesi önem arz etmektedir [2]. IoT cihazlar arasında, güvenli haberleşme sunan çalışmaların literatürde yeterli olmadığı görülmektedir [3].

Nesnelerin İnterneti mimarisinde küçük ve düşük güçlü cihazlar kullanımı yaygındır. Karmaşıklıkları nedeniyle, geleneksel şifreleme yöntemleri ve algoritmaları doğrudan uygulamak zordur. Şifrelemek ve kodunu çözmek için çok sayıda tur gerektirir ve cihazlarda bulunan sınırlı enerjiyi boşa harcar. Bu nedenle, akademik ve ticari IoT çalışmalar düşük maliyetli, yüksek verimli güvenlik çözümlerine odaklanmıştır [1-3]. Düşük maliyetli güvenlik çözümleri seçerken çeşitli saldırılara karşı dayanıklığı, daha az enerji tüketimi, daha küçük paket boyutu ve daha az hesaplama yüküne sahip olan farklı kriterler dikkate alınmalıdır.

Bu tez çalışmasında, literatürdeki çalışmalara katkı sağlamak ve yukarıda açıklanan IoT güvenlik problemlerine bir çözüm sağlanması açısından, IoT nesnelerin çalışması dikkate alınarak, yeni ve özgün bir haberleşme teknolojisi geliştirmesine odaklanılmıştır.

Günlük hayatta kullanılan akıllı cihazlar hassas ve özel veriler üretmektedir. Bilginin kötü niyetli kişilerin eline geçmesi kullanıcı için oldukça kötü sonuçlar doğurabilir.

Bunu engellemek için, Nesnelerin İnternetinde güvenlik ve gizliliğin sağlanması oldukça fazla önem arz eder. Konuyla ilgili önemli bir araştırma OWASP (Open Web Application Security Project) tarafından gerçekleştirmiştir (Tablo 1.1 [4]). OWASP Nesnelerin İnterneti projesi, üreticilerin, geliştiricilerin ve tüketicilerin Nesnelerin İnterneti ile ilişkili güvenlik sorunlarını daha iyi anlamalarına yardımcı olmak ve herhangi bir bağlamda kullanıcıların IoT teknolojilerini oluştururken, dağıtırken veya değerlendirirken daha iyi güvenlik kararları almalarını sağlamak için tasarlanmıştır.

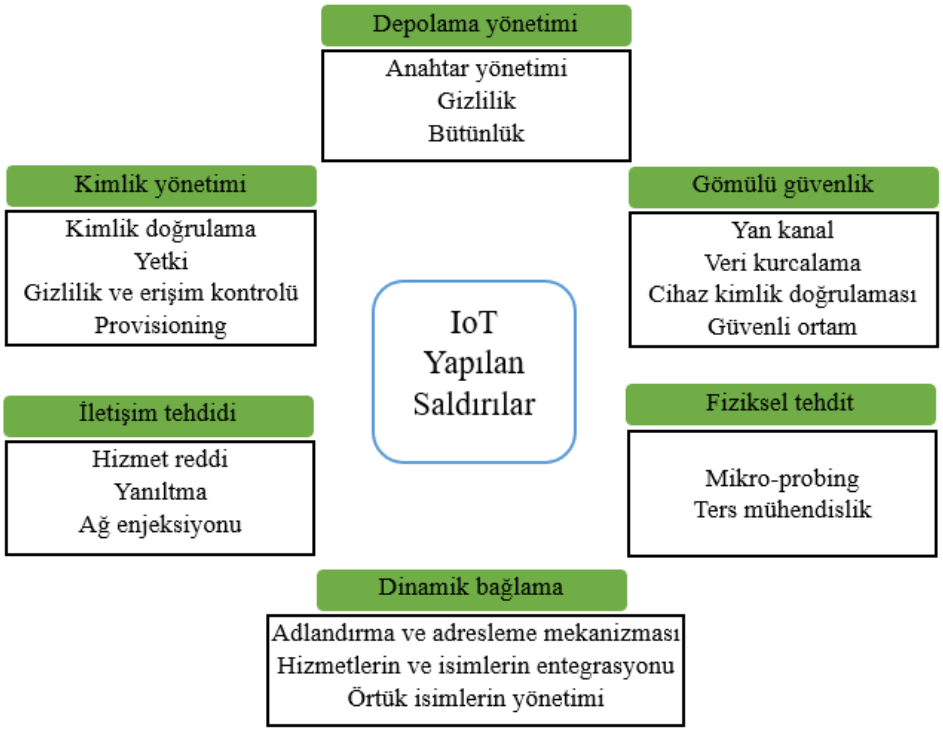
**Tablo 1.1.** OWASP IoT Güvenlik Top 10.

| OWASP IoT TOP 10 | Uygulama Güvenliği | Ağ Güvenliği |
|---|---|---|
| I1- Zayıf, Tahmin Edilebilir veya Sabit Kodlanmış Şifreler | Evet | Biraz |
| I2- Güvensiz Ağ Servisleri | Biraz | Evet |
| I3- Güvenli olmayan ekosistem Arayüzleri | Evet | Biraz |
| I4- Güvenli Güncelleme Mekanizmalarının Olmaması | Evet | Biraz |
| I5- Güvensiz veya Güncel Olmayan Bileşenlerin Kullanımı | Evet | Evet |
| I6- Yetersiz Gizlilik Koruması | Evet | Evet |
| I7- Güvensiz veri İletilmesi | Evet | Evet |
| I8- Cihaz Yönetimi Eksikliği | Evet | Evet |
| I9- Güvensiz Varsayılan Ayarlar | Biraz | Biraz |
| I10- Yetersiz Fiziksel Güvenlik | Hayır | Biraz |

OWASP IoT Top 10 kategorisinin derinlemesine araştırılması IoT güvenlik açıklarının genel olarak üç kategoride sınıflandırılabileceğini öne sürüyor: Yazılım, sistem ve donanım. Yazılım açıkları, IoT sisteminde farklı katmanlarda çalışan uygulamalarla ilişkili güvenlik sorunlarını ifade eder. Bunun yerine, sistem güvenlik açıkları, dağıtılan sistemin yapılandırmasının yanı sıra aygıtların bellenimi veya işletim sistemleriyle ilgili güvenlik sorunlarına atıfta bulunur. Son olarak, donanım güvenlik açıkları, donanım bileşenleri ve içinde çalıştıkları fiziksel ortamla ilişkilendirilir. Tez çalışması, OWASP IoT Top 10'da (Tablo 1.1) verilen Nesnelerin İnterneti alanında güvenlik durumlarının iki tanesine doğrudan çözüm sunmaktadır. Bunlar "I2- Güvensiz Ağ Servisleri" ve "I7- Güvensiz veri İletilmesi" riskleridir. Bu iki risk hem

uygulama (Yazılım) güvenliğini hem de Ağ (Sistem) güvenliğini tehdit etmektedir. Güvensiz Ağ Servisleri, saldırganın cihazdaki veri veya kontrollere erişmek için ayrıntılı izinlerin eksikliğini kullanmasına yol açar. Saldırgan, şifre seçeneklerinin eksikliğini diğer saldırıları gerçekleştirmek için de kullanabilir. Güvensiz veri İletilmesi, ağ bağlantısı üzerinden erişime sahip olan herkesi ilgilendirir. Saldırgan, ağ üzerinden iletilen verileri görüntülemek için ağ trafiğinde şifreleme eksikliğini kullanır. Bu zafiyette, güvenlik zayıflığı açısından yaygın bir zafiyettir. Ağ trafiğinde şifreleme eksikliği veri kaybına neden olabilir ve maruz kalmış verilere bağlı olarak cihazın veya kullanıcı hesaplarının tamamen ele geçirilmesine neden olabilir. İletişimde güvenli bir haberleşmenin kullanımı, sunulan tez çalışmasının motivasyonunu oluşturmaktadır.

Konuyla ilgili diğer bir araştırma IoT cihazlarına yapılan saldırılar Şekil 1.1'de [5] sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırmada beş farklı sınıftaki saldırıların iki tanesi (Şifreleme ve Ağ saldırıları) doğrudan haberleşme ile ilgilidir. Sonuç olarak tez çalışması IoT teknolojisi açısından önemli bir ihtiyacı karşılayacaktır.




**Şekil 1.1.** IoT'ye yapılan saldırılar.

## 1.1. Problem Tanımı ve Motivasyon

Güvenli olmayan ağın güvenlik açıklarına ve istenmeyen hasarlara yol açabileceği, açıktır. Verileri istenmeyen erişimlerden korumanın olası yollarından biri, onları güçlü algoritmalarla şifrelemektir. Kaynak sınırlı cihazlar için, RSA, SHA ve diğerleri gibi tipik şifreleme algoritmaları ölçeklenemez. Klasik şifreleme algoritmaları masaüstlerinde, telefonlarda, tabletlerde ve sunucularda kullanılmak üzere tasarlanırken, hafif siklet şifreler, gömülü sistemler ve algılayıcı ağları üzerinde uçtan uca güvenlik sağlamak için ideal çözümlerdir. Gömülü sistemler çoğunlukla 4, 8, 16 ve 32 bit mikro denetleyiciler kullanırlar. Burada bahsedilen tüm özellikler, klasik yöntemler yerine hafif siklet kriptografi kullanımına yol açmaktadır. Tezin amacı IoT alt kümesi olarak kabul edilen Kablosuz Algılayıcı Ağları (KAA) için hafif siklet şifreleme algoritmaları kullanarak, güvenli veri iletiminin sağlanmasıdır. Farklı güvenlik taleplerine göre, hafif siklet şifreleme algoritmalar, uçtan uca şifreleme için önemli ölçüde tercih edilen çıkar yoludur. Hafif siklet algoritmalar hızlı bir şekilde uygulanabilir ve kaynak kısıtlamalı algılayıcı düğümleri için uygundur.

## 1.2. Literatür Taraması

Kablosuz Algılayıcı Ağların zafiyetleri s-spesifik modeline dayalı olarak [6]'de tartışılmıştır. Adı geçen çalışmada, algılayıcı düğümlerinin güvenlik özelliklerini artırmak için güvenilir bir Kablosuz Algılayıcı Düğüm çerçevesi sunulmuştur. Çerçeve, güvenlik geliştirme ve güvenilir kimlik doğrulama protokolü sağlamaktan sorumlu iki ana platform içerir. KAA destekli IoT'deki güven modelleri (Algı güveni, iletişim güveni ve veri birleştirme güveni), mevcut zorluklar ve ilerlemeler üzerine bir araştırma [7]'de incelenmiştir. IoT tabanlı kablosuz algılayıcı ağlarında yeterli bir güvenlik derecesi sağlamak için Deebak ve Fadi [14], karmaşık (Hybrid) güvenli yönlendirme (Routing) sağlamak için Two-Fish simetrik anahtar yöntemi önermişler. IoT ve KAA, temel özellikleri, uygulamaları, teknolojileri, KAA saldırıları, IoT ve KAA özelliklerini anlamak için iyi bir referans olan mevcut çözümler hakkında kapsamlı bir özet sunulmuştur [15]. Geleneksel bir KAA'nın güvenlik açıkları, KAA için bilinen güvenlik saldırıları, IoT Güvenlik mimarisi, IoT zorlukları ve farklı katmanlar üzerindeki güvenlik sorunları [16]'de açıklanmıştır. Çalışmada ayrıca Blokzincir (Blockchain) teknolojisinin IoT üzerinden uygulanmasına da değinmişler. Veri ve kullanıcı gizliliğine dayalı KAA erişim kontrol modelleri, esneklik, acil erişim

desteği ve erişim kontrolü çözümleri için Eliptik Curve Kriptografisi [17]'da sunulmuştur. [18]'deki çalışmada, açgözlü (Greedy) yönlendirme tekniğini ve RUT şemasını kullanarak KAA tabanlı bir IoT ağı üzerinden güvenli aktarım verileri sağlamak için SAVEER adlı bir protokol önerilmiştir. SAVEER, verileri iç ve dış tehditlerden koruyacaktır. Poongavanam [19], Kablosuz Algılayıcı Ağlarında güvenlik zorlukları ve saldırı türlerini ele almıştır. Ayrıca, KAA yönlendirme protokolleri için mevcut saldırıları kategorilere ayırmışlardır. Nabaa [20], anahtar yönetim sürecini iyileştirmek için Lojistik Harita Diffie Hellman (LMDH) algoritmasını kullandı. Ayrıca kimlik doğrulama ve Ortadaki Adam (Man-in-the-middle) ve tekrar oynatma (Replay) gibi yaygın siber saldırılara karşı önlemler için subMAC kullandılar. Yazarlar ayrıca çalışma süresini azaltmak ve güvenliği artırmak için KAA varsayılan AES 128 şifreleme algoritması yerine RSA algoritmasını kullandılar. Kablosuz algılayıcı ağlara yapılan saldırılar, aktif ve pasif saldırılara ayrılmıştır. Gizli dinleme, trafik analizi ve kamuflaj, pasif saldırılara iyi örneklerdir. Node Capture Attack, Sybil Attack ve Denial of Service (DoS) en yaygın aktif saldırı örnekleridir. Ghani et al. [21], KAA için Li ve ark. [22] tarafından IoT ortamında önerilen kimlik doğrulama protokolünü genişletmiştir. İzlenebilirlik ve çalıntı doğrulayıcı saldırı (Stolen-verifier attack) güvenlik açıklarını ele geçirmek için simetrik kriptografik kimlik doğrulama yöntemini kullandılar. Hafif siklet şifreleme kullanımına yönelik bir diğer çalışma [23]'de sunulmuştur. Çalışmada, trafik sıkışıklığının ve park yönetiminin akıllı izlenmesi için bir IoT altyapısı aracılığıyla KAA üzerinden aktarılan verilerin güvenliğini sağlamak için karışık bir hafif siklet şifreleme (PRESENT-GRP) kullanılmıştır. Önerilen sistem, akıllı bir park izleme sistemi içindeki düğümlerin hesaplama maliyetini ve enerji tüketimini ölçmek için kullanılır. Dört hafif siklet şifrelemenin (AES-128, XXTEA, Skipjack ve RC5) enerji tüketimi, [24]'te bir MICAz KAA modülü üzerinden XMAC, CMAC, HMAC ve CBC-MAC teknikleri ile ölçülmüştür. Çalışmada, şifresiz (No-Security) ve şifreli (Enciphered) olmak üzere iki mod üzerinde değerlendirmelerde bulunulmuştur. Zirem [25], gerçek zamanlı KAA ve IoT uygulamalarını güvence altına almak için 8 bitlik bir mikro denetleyici üzerinden kaos tabanlı bir sistem kullanmayı önermiştir. Önerilen sistem iki ayrı lojistik harita (Tek boyutlu) kullanmaktadır. Bu sistemin zaman alıcı hesaplamalardan kaçınması gibi bazı avantajları vardır. Yazılım Tanımlı Ağ (YTA) mimarisi, güvenlik zorlukları, YTA ve IoT uygulamaları için çözümler ve YTA'nın IoT ve KAA ile entegre edilmesi olasılığı [26]'te analiz edilmiştir. Kablosuz algılayıcı verilerinin bulut üzerinden

aktarılması da özellikle akademik amaçlar için hızlı bir büyüme göstermektedir. Dwivedi et al. [27], bulut ve KAA üzerinden güvenlik sorunları ve farklı saldırı türleri hakkında bir özet yazmıştır. Düğümler arasında güvenli iletişim sağlamak için yazarlar [28], kimlik doğrulama ve anahtarların yönetimi için kullanılmak üzere Eliptik Curve Kripto Sisteminin (ECC) kullanılmasını önerdiler. Ağ dağıtımı, komşuları tanıma, şifreleme/şifre çözme süreçleri ve imzaları doğrulama, KAA ve IoT'de ECC'yi uygulamanın temel adımlarıdır. KAA üzerinden büyük veri uygulamaları için güvenlik hususlarının üstesinden gelmek için Smys [29], enerjiye duyarlı bir yönlendirme protokolü önermiştir. Bahsedilen algoritma üç adımda uygulanmaktadır: Yol tanımlama, bilgi aktarma (Şifreleme/şifre çözme) ve bakım prosedürü. Önerilen yönlendirme protokolü performansı, enerji tüketimi, iş çıkarma oranı, gecikme, paket teslim oranı ve ağ ömrü açısından LCRP ve LEACH protokolleriyle karşılaştırılmıştır. Shafiqul Abidin [30], kötü niyetli (Malicious node) düğümleri tespit etmek ve bilgileri güvende tutmak için hafif uzman sistemler konseptini uygulamıştır. KAA'ı güvenlik saldırılarından korumak için ADIOS ve CLIPS motorlarını kullandı. KAA güvenlik yönleriyle ilgili bir özet [31-34]'te incelenmiştir. [35]'te, Zigbee modülü CC2530 ve Cortex A-9 işlemcileri üzerinde bir LED hafif siklet algoritması uygulanmıştır. Farklı veri uzunluğu için LED algoritmasının enerji tüketim karşılaştırması AES'e göre değerlendirilmiştir. Ayrıca tekrar oynatma, dinleme ve bilinen anahtar saldırıları için iki algoritma arasında güvenlik analizi yapılmıştır. KAA'ı güvenceye almak için Sumalatha [36] tarafından, katmanlar arası tabanlı bir güvenlik tanıtım sistemi (CLS-IDS) ve katmanlar arası bulanık tabanlı güven hesaplama mekanizması (CLS-FTCM) tanıtılmıştır. İlki ağ performansını ve ağ ömrünü iyileştirebilir, enerji tüketimini azaltabilir ve QoS gereksinimlerini karşılayabilir. İkincisi, KAA için daha iyi güvenlik sağlar. IoT tabanlı Kablosuz Algılayıcı Ağlarda izinsiz girişlere karşı bir savunma mekanizması sağlamak için [37]'da ağ ömrünü artırabilecek güvenli, enerji açısından verimli bir protokol önerilmiştir. Önerilen algoritma üç aşamada çalışmaktadır: Küme oluşturma, güvenli yönlendirme ve küme başlıklarını güncelleme. Sharma [38] çalışmasında, KAA'da güvenliğini sağlamak için çapraz katmanlı entegre çerçeve önerilmiştir. Bu yapıda akıllı bir güvenlik aracısı (ISA) bulunmaktadır. Bu aracı, katmanlar arası etkileşimlerden ve güvenlik seviyelerinin değerlendirilmesinden sorumludur. Gawdan [39] çalışmasında katmanlar arası kapsamlı bir güvenlik çerçevesi (CLBCSF) kullanımını önerilmiştir. Adı geçen modelde, Kablosuz Algılayıcı Ağlar için hiyerarşik bir güvenlik çerçevesi sunulmaktadır. Bu model, yeni

bir anahtar yönetim modülü, güvenli iletişim protokolü (Ağ tabanlı) ve Hiyerarşik küme oluşturma bölümü içermektedir. KAA için çapraz katman tasarım yaklaşımları ve zorlukları hakkında kapsamlı bir araştırma, [40-42]'de sunulmuştur. Khashan [43], KAA düğümleri için şifreleme parametrelerinin seçimini (Her düğümün kaynakları nedeniyle) otomatikleştiren bir FlexCrypt şeması tasarlamıştır. Ayrıca, güvenli veri alışverişi sağlamak için çalışmada yeni kimlik doğrulama ve anahtar-yönetim yöntemler önerilmiştir. [44]'te asimetrik kriptografi algoritması (RSA) ve ECC algoritmalarına dayalı bir karmaşık kriptografik şema (DECRSA) önerilmiştir. KAA için yüksek bir güvenlik seviyesi sağlamak için, ECC özelliklerinden faydalanıp ve RSA sistemini kullanarak önerilen yöntem geliştirilmiştir. Algılayıcı bilgi sistemlerinde geliştirilmiş güç verimli toplama algoritması [45]'te ele alınmıştır. Çalışmada, iletim sırasında enerji tüketimini azaltmak için en uygun iletişim mesafelerini belirlenmiştir. Bu yöntemde, düğümler arasındaki enerji tüketimini dengelemek için mobil alıcı düğüm teknolojisini kullanarak, önerilen algoritmanın enerji tüketimi, ağ gecikmesi ve kullanım ömrü açısından iyi bir performans sergilemiştir. Tabatabaei [46]'te algılayıcı düğümlerini kümelemek için sosyal örümcek optimizasyonu adlı bir algoritma önermiştir. Çalışmada, koloninin biyolojik kurallarına göre bir grup örümcek, ağ ömrünü artırmak için birbirleriyle etkileşime girmektedir. Wang [47], büyük ölçekli kablosuz algılayıcı ağları için bir zamanlama yöntemi önermiştir. Çalışmada, optimum kapsama oranına sahip park konumlarını bulmak için parçacık sürüsü optimizasyonunu mutasyon operatörüyle birleştirilmiştir. [48]'de, enerji dağılımını ve optimal küme başı seçimini iyileştirmek için Cuckoo araştırması baz alınarak parçacık sürüsü optimizasyon tekniği kullanılmıştır. [49]'de, tarım alanı izlemede kullanılacak KAA için matematiksel bir güç tüketimi modeli sunulmuştur. Atarraya ağ simülatörünü kullanarak, birkaç protokolü ve hafif siklet şifrelerini değerlendirilmiştir. Carlos Anders [50] bir FPGA üzerinden Encrypt-then-MAC jenerik kompozisyonunun iş çıkarma oranını, gecikmesini ve enerji tüketimini değerlendirilmiştir. AES 128, PRESENT 128, SHA 256 ve SPO 88'i temel şifreleme algoritma olarak baz almıştır. Mahato [51], değiştirilmiş ECC algoritmasını kullanan bir sistem önermiştir. Paket göndermek için yürütme sürelerini karşılaştırarak geleneksel ve önerilen ECC algoritmalarını değerlendirmiştir. Kalyane [52], ECC algoritmasına dayalı hafif bir güvenli veri doğrulama şemasını (LWSDAS) tanıtmıştır. LEACH, SLEACH ve önerdikleri algoritma çeşitli kriterlere göre karşılaştırılmıştır. IoT uygulamaları için blok şifrelemeye dayalı hafif siklet kriptoloji algoritmalarını

[53]'de incelemiştir. IoT ağ uygulamalarında sıklıkla kullanılan mikro denetleyiciler, mobil cihazlar, akıllı kartlar gibi kısıtlı kaynaklara sahip cihazlar üzerinde en sık kullanılan kriptografik algoritmaların performans değerlendirmesini [54]'te ele alınmıştır. LICITUS çerçevesi [55], bir IEEE 802.15.4 ağında 2. katman güvenlik hizmetlerini etkinleştirir, yapılandırır ve yönetir. Bu işlemlerin tümü dağıtılmış bir şekilde yürütülür. Üretici tarafından depolanan veya sistem yöneticisi tarafından güncellenen bir dizi kriptografik malzeme ve konfigürasyon değişkeninden başlayarak, aslında, her düğüm, herhangi bir uzaktan kumandanın kontrolüne gerek duymadan güvenlik hizmetlerini bağımsız olarak önyükleyebilir ve komşularıyla bağlantı düzeyinde anahtarlar üzerinde anlaşabilir. IoT için DTLS ve CoAP entegrasyonu (Lithe) [56]'te ele alınmıştır. Lithe ayrıca, 6LoWPAN standardından yararlanarak enerji tüketimini önemli ölçüde azaltmayı amaçlayan yeni bir DTLS başlık sıkıştırma şeması önermektedir. En önemlisi, önerilen DTLS başlık sıkıştırma şema, DTLS tarafından sağlanan uçtan uca güvenlik özelliklerinden ödün vermez. Aynı zamanda, DTLS standart uyumluluğunu korurken iletilen bayt sayısını önemli ölçüde azaltır. Singh [57], MQTT ve MQTT-SN için güvenliği artırılmış SMQTT ve SMQTT-SN haberleşme protokoller önermiştir. Önerilen çözüm, Key/Ciphertext Policy-Attribute Based Encryption (KP/CP-ABE) yöntemine dayanmaktadır. ABE kullanmanın avantajı, tek bir şifreleme ile mesajı birden fazla kullanıcıya teslim edilir ve dolayısıyla IoT uygulamaları için uygun olan doğal tasarımından kaynaklanmaktadır. [58]'de MQTT protokolünü kullanarak güvenli bilgi alışverişi ve tüm IoT altyapısını güvence altına almak için yeni bir yaklaşım önerilmiştir. MQTT protokolüne ve ortak anahtar altyapısı "PKI"ye dayalı olarak iletişim ve güvenlik anahtarını yönetmek için yeni bir yaklaşım kullanılırmıştır. Şifreleme/şifre çözme aşamasında, her birinin avantajını ve faydasını sağlamak için iki farklı yaklaşım (RSA ve Eleptic Curve) kullanılmıştır. PRESENT ve LBlock algoritmaların IoT ortamında performans değerlendirmesi [59-60]'de karşılaştırılmıştır. Nesnelerin İnternet'inin bir alt alanı olan kablosuz algılayıcı ağlarda sistem kaynaklarını minimum kullanarak güvenlik seviyesini arttırmaya yönelik olarak düşük güçlü şifreleme algoritmaları ile kaotik şifrelemenin kullanımının önerildiği çalışmalar da gerçekleştirmişlerdir [61-64]. Tablo 1.2'de, literatürdeki KAA için güvenlik çözümlerine ilişkin bazı ilgili çalışmaların özeti tez kapsamında yapılan ve ölçülen faktörler ile bir karşılaştırması sunulmaktadır.

**Tablo 1.2.** KAA için güvenlik çözümleri karşılaştırması.

| Makale | | Platform | Değerlendirme Metrikleri | Algoritmalar | Karşılaştırma Yöntemi |
|---|---|---|---|---|---|
| Othman [24] | | MICAz mote | Enerji tüketimi | Skipjack, XXTEA, RC5, AES-128 | Yükler (8, 16, 24, 32) |
| Khashan [43] | | Contiki (Cooja) ağ simülatör | Ağ ömrü, güç tüketimi, şifreleme süresi | AES, TEA, FlexCrypt, FlexenTech | Blok boyutu (4, 8, 16, 32, 64, 128), tur sayısı |
| Tabatabaei [46] | | OPNET Modeler 11.5 | Protokoller (DCRRP, SSFBCA, NODIC), enerji tüketimi, orta erişim gecikmesi, iş çıkarma oranı, uçtan uca gecikme | Social Spider Optimizasyon (SSO) | 50 düğüm |
| Radosavljević [49] | | Atarraya ağ simülatör | Protokoller (A3, A3 kapsama, EECDS, CDS rule K), protokol başına güç tüketimi | AES, Noekeon, LED 128, PRESENT, Prince, Piccolo, TWINE, Simon 64/96, KATAN 64 | Algoritmaların blok uzunlukları (64, and 128 bayt) |
| Carlos Anders [50] | | FPGA | Güç tüketimi, gecikme, iş çıkarma oranı, FPGA kaynakları | AES, PRESENT, SHA-256, SPO-88 | FPGA units of slices (SLC), Look-Up Tables (LUT), and Flip-Flops (FF) |
| Anisha Mahato [51] | | NS simülatör | Yürütme zaman farkı | Önerilmiş ECC, ECC | Yükler (4, 8, 16, 32 bits) |
| Kalyane [52] | | NS-2 simülatör | Enerji tüketimi, paket teslim oranı, uçtan uca gecikme, ek yük | LWSDAS, LEACH, SLEACH | Düğüm sayısı (10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100) |
| Tez çalışması | 1. aşama [13] | Raspberry Pi 3 ve Arduino Mega 2560 | RAM, ROM, çalışma süresi, çıktı, birleşik metrik, enerji tüketimi, döngü/bayt | AES, PRESENT, LBlock, Skipjack, SIMON, XTEA, PRINCE, Piccolo, HIGHT, RECTANGLE | Yükler (8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024, ve 2048 bayt), şifreleme ve şifre çözme modları |
| | 2. aşama [66] | Donanım (MICAz mote), ve Riverbed (OPNET) Modeler 18.5 | Ortalama çalışma süresi, iş çıkarma oranı, enerji tüketimi, bellek kullanımı (RAM ve ROM), uçtan uca gecikme | AES, RECTANGLE, Fantomas, Camellia | Yükler (16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024 bayt) ve Düğüm sayısı (5, 10, 25, 50) |
| | 3. aşama | Donanım (Zolertia Z1 mote), ve MQTT-SN (Contiki-Cooja simülatör) | Ortalama enerji tüketimi, bellek kullanımı (RAM ve ROM), iş çıkarma oranı, uçtan uca gecikme, çalışma süresi | AES, RECTANGLE, Fantomas, Camellia | Yükler (16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024 bayt) ve Düğüm sayısı (5, 10, 25, 50) |

## 1.3. Tezin Katkıları

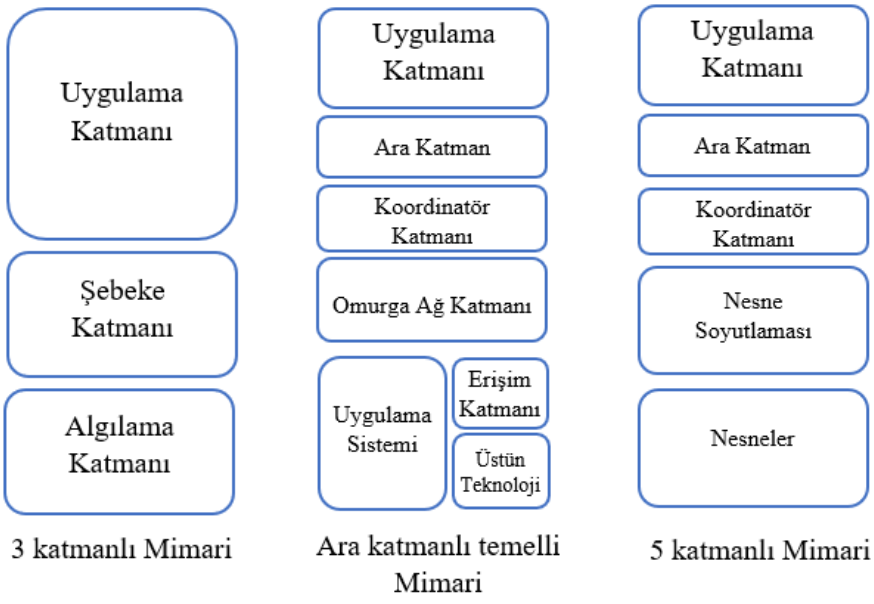
Tezin ana katkıları aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır:

- IoT nesnesi gibi kısıtlı donanımlarda kullanılabilecek hafif siklet kriptoloji algoritmaları ayrıntılı olarak incelenmiştir.
- Raspberry Pi 3 ve Arduino Mega 2560 platformlar üzerinde hafif siklet kriptoloji algoritmalarının RAM, ROM kullanımı, çalışma süresi, enerji tüketimi gibi metriklere göre başarım değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir.
- IoT uygulama geliştiriciler için donanımlara uygun algoritma seçimi için yol gösterilmiştir. MICAz algılayıcı (8-bit Atmel ATmega128L mikro denetleyici) ve ağ simülatörü (Riverbed (OPNET) Modeler) üzerinden üç hafif siklet şifreleme artı AES-128'in (Kriptoanaliz özelliklerine odaklanarak) önerilmesi ve yazılım uygulaması.
- Hafif siklet kriptoloji algoritmalarının uygulamaya özgü seçilebildiği, MQTT-SN protokolüne dayalı IoT güvenlik protokolü önerilmiştir.
- Kullanıcı istekleri veya artırılmış BER gibi çeşitli uygulama güvenlik gereksinimlerine göre Zigbee ağları için dört aşamalı bir güvenlik düzeyi (FS-SSL) önerilmiştir. Kullanıcıya güvensiz veya güvenli modlar arasında seçim yapma yeteneği vermek için Zigbee MAC başlığında ayrılmış rezerve çerçeve kontrol alanı bitleri kullanılmıştır. Kullanıcı tarafından talep edildiğinde veya bit hata oranında bir artış olduğunda, fiziksel katmandan MAC katmanına geri bildirim göndermek için güvenli veri transferinde çapraz katmanlı mimari kullanılmıştır. MAC katmanı daha sonra verileri daha düşük ağırlıklı bir algoritma ile yeniden şifreleyecektir (Bu, kod içinde daha düşük çalışma süresi veya daha düşük bellek kullanımı gibi çeşitli ilkeler uygulanarak tanımlanabilir). Alternatif bir algoritma ile şifreleme, veri gizliliğini artıracak ve özellikle kaynak kısıtlaması IoT uygulamaları için verilerin yetkisiz erişime karşı daha iyi korunmasına, ağ ömrünün artmasına ve enerji tüketiminin azalmasına yardımcı olacaktır.
- Önerilen şema, KAA'lar için yazılım tabanlı bir güvenlik çözümü olarak adil bir ölçüm ve karşılaştırma yapmaktadır.
- MQTT-SN mesajlaşma standardını kullanarak uçtan uca seçilen dört kriptoloji algoritması kullanılarak şifreleme yapıldı. Simülasyonlar Contiki (Cooja)

üzerinde gerçekleştirildi. MQTT-SN Kontrol Paketinde rezerve olan bitleri kullanarak, kullanıcı şifresiz veya şifreli modlarda tanımlanan hafif siklet algoritmalardan birini seçebilir. Performans değerlendirmeleri, Zolertia Z1 algılayıcı ve Contiki (Cooja) üzerinden çoklu senaryolar için bellek, iş çıkarma oranı, pil tüketimi ve uçtan uca gecikmeye dayalı ve ortalama çalıştırma zamanı olarak ölçülüp ve karşılaştırılmıştır.

## 2. NESNELERİN İNTERNETİ

Günümüzde, Nesnelerin İnterneti birçok uygulaması insan yaşamının benzersiz yönlerinde görülmektedir. Nesnelerin İnterneti, algılayıcılar, işleme yeteneği olan ve diğer cihazlarla (İnternet veya diğer şebekeler) veri alışverişi yapan teknolojilere sahip fiziksel nesneleri tanımlar. Akıllı evler, giyilebilir cihazlar, endüstriyel akıllı izleme sistemleri, IoT'nin bazı örnekleridir. Kevin Ashton ilk kez 1999 yılında bir RFID projesi kapsamında nesnelerin interneti terimini tanıttı. Nesnelerin İnterneti teriminin ilk kez kablolu veya kablosuz olarak birbirine bağlanabilen, birbiriyle ilişkili bir cihaz grubu olarak ortaya çıktığı 2009 yılına bakılırsa, şimdiye kadar teknolojiler, altyapı ve IoT kullanımı için artan bir ilerleme görebilir. IoT'nin genel büyümesine iki ana faktör yardımcı olmaktadır: Hızlı internet bağlantıları ve bulutu kullanmak. Hızlı internet bağlantıları açısından, 5G ağlarına yönelik eğilim etkisini gösterecektir. Bulut tabanlı çözümler, ölçeklenebilir bir IoT ağı oluşturmak ve sürdürmek için hayati önem taşıyan veri mobilitesi ve iş birliği sağlar. IoT düğümlerinin sınırlı pil koşulları nedeniyle belirli bir fiziksel boyutu, işlem gücü ve bellek kapasitesi vardır. İşlemsel teknolojiler, bilgi teknolojiler ve akılı nesneler, nesnelerin internetin ağ bileşenleridir. Şekil 2.1 [1], IoT için bazı önerilen katmanlı mimarileri göstermektedir.

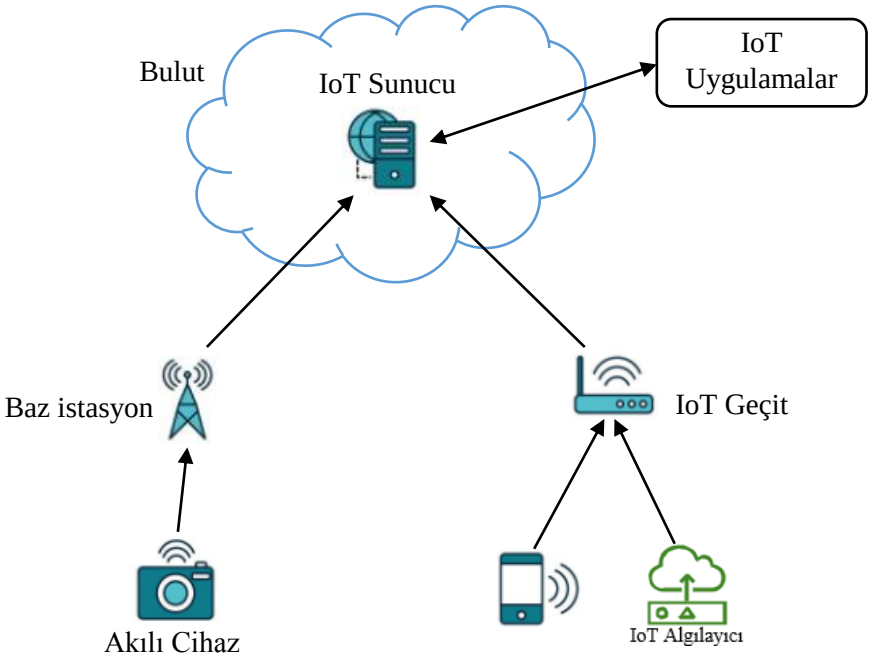



**Şekil 2.1.** IoT için bazı örnek katmanlı mimariler.

IoT ekosistemindeki yenilik, gerçek ve dijital dünya arasındaki boşluğu kapatmaktadır. IoT'deki en büyük teknik zorluklar aşağıda listelenmiştir:

- Teknoloji
- Standardizasyon eksikliği
- Güvenlik
- Gizlilik
- Büyük veri yönetimi
- Birlikte çalışabilirlik

Şekil 2.2 [3] genel bir IoT ağ mimarisini göstermektedir. Cihazlar geçit veya baz istasyon vasıtasıyla buluta bağlanmışlar. Ağ geçidi, bulut ile kontrolörler, algılayıcılar ve akıllı cihazlar arasında bağlantı noktası görevi gören fiziksel bir cihaz veya yazılım programıdır. Buluttaki IoT sunucular farklı uygulamalar için veri toplama, işleme, kaydetme, bildirim ve yayınlama için geliştirilmiş standart veri yönetimi fonksiyonlarını donatır.




**Şekil 2.2.** Genel IoT ağ mimarisi

Öte yandan IoT'de birçok ağ teknolojisi kullanılmaktadır. Tablo 2.1 [67], kullanılan IoT teknolojileri, avantajları, dezavantajları ve örnek kullanım alanlarını göstermektedir.

**Tablo 2.1.** IoT'deki kullanılan iletişim teknolojilerin karşılaştırması.

| Ağ | Bağlantı | Avantaj (+), Dezavantaj (-) | Popüler kullanım alanları |
|---|---|---|---|
| Ethernet | Kablolu, kısa menzil | + Yüksek hız<br>+ Güvenli<br>- Kısıtlı hareket imkânı | Video kameralar, oyun konsolları |
| Wifi | Kablosuz, kısa menzil | + Yüksek hız<br>+ Mükemmel uyumluluk<br>- Kısıtlı menzil<br>- Yüksek güç tüketimi | Akılı evler, kolayca şarj edilebilen cihazlar |
| NFC | Kablosuz, ultra kısa menzil | + Güvenilirlik<br>+ Düşük güç tüketimi<br>- Kısıtlı menzil<br>- Müsaitlik eksikliği | Ödeme sistemleri, akılı evler |
| Bluetooth | Kablosuz, kısa menzil | + Yüksek hız<br>+Düşük güç tüketimi<br>- Düşük bant genişliği<br>- Yüksek gecikme | Küçük ev aletleri, giyilebilir cihazlar |
| LPWAN | Kablosuz, uzun menzil | + Uzun menzil<br>+ Düşük güç tüketimi<br>- Düşük bant genişliği<br>- Yüksek gecikme | Akılı evler, akılı şehirler, akıllı tarım |
| Zigbee | Kablosuz, kısa menzil | + Düşük güç tüketimi<br>+ Ölçeklenebilirlik<br>- Kısa menzil<br>- Uyumluluk sorunları | Ev otomasyonu, sağlık ve sanayi siteleri |
| Hücresel ağlar | Kablosuz, uzun menzil | + Neredeyse küresel kapsama<br>+ Yüksek hız<br>+ Güvenilirlik<br>- Maliyetli<br>- Yüksek güç tüketimi | Video ve görüntü gönderen dronlar |

Tipik bir Kablosuz Algılayıcı Ağı (KAA), belirli fiziksel alanın koşullarını (Ses, basınç, hareket ve sıcaklık gibi) izlemek ve toplamak için entegre algılama teknolojisi ve kablosuz iletişim içerir. KAA'ler, askeri, endüstri ve sağlıktan çevresel ve kentsel kullanıma kadar düşük maliyetli ve hızlı dağıtım çözümleri sunmalarıyla ünlüdür. Zigbee (802.15.4) standardı, çoğu kablosuz algılayıcı ağı için temel altyapıdır. KAA, genellikle nesnelerin interneti sistemi içindeki bir teknolojidir. KAA düğümlerini internete bağlamak, kullanıcı avantajlarını artırır ve akıllı çevrimiçi uygulamaları güçlendirir. KAA'ler için geleneksel güvenlik mekanizmaları zayıftır veya etkin bir şekilde kullanılamaz.

IoT düğümleri ve veri merkezleri arasında aktarılan yüksek trafik yoğunluğuna bakıldığında, güvenlik sağlama adı verilen başka bir çaba var. Güvenli olmayan bir ağın güvenlik açıklarına ve istenmeyen hasarlara yol açabileceği açıktır. Verileri istenmeyen erişimlerden korumanın olası yollarından biri, onları güçlü algoritmalarla şifrelemektir. Algılayıcı ağlar farklı teknolojiler, güç zamanlama gereksinimleri, geçit (Gate) sayısı ve kriptografik fonksiyonların uygulanması ile ilişkilendirilir.

## 2.1. IoT Yaygın Mesajlaşma Protokolleri

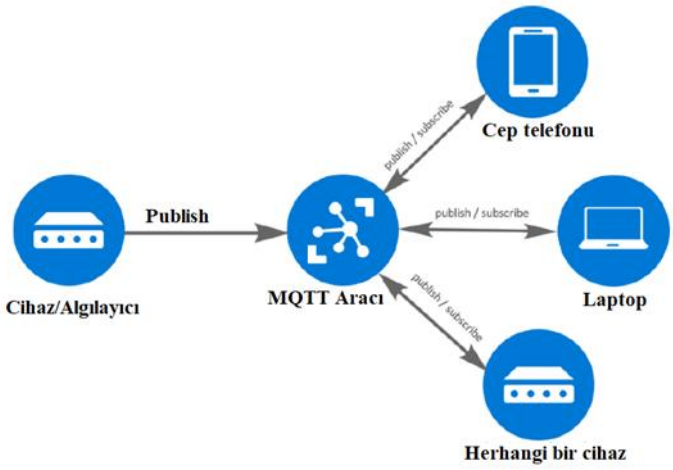
IoT cihazları, birbirleriyle iletişim kurmak için her katmanda çeşitli mesajlaşma ve iletişim protokolleri kullanır. Bir IoT cihazı oluştururken tipini, işlevselliğini ve katmanını akılda tutmak önemlidir. Piyasada çok çeşitli mesajlaşma ve iletişim protokolleri mevcuttur. Teknoloji uzmanları, IoT ekosistemlerine hizmet etmek için bir ağ oluştururken birden fazla iletişim protokolü arasından seçim yapılabilir. En yaygın olan mesajlaşma protokolleri aşağıda tartışılmaktadır.

### 2.1.1. MQTT

MQTT [68], hafif yayınla/abone ol mesajlaşma aktarımı nedeniyle yaygın olarak popülerlik kazanan bir IoT iletişim protokolüdür. Çeşitli makineler arasında veri aktarımı yapan bir protokoldür. Nesnelerin internetinde önemli protokollerden biri haline gelmiştir. Tüm cihazlar bir aracı (Broker) veya sunucu (Server) aracılığıyla iletişim kurar. İstemciler (Client), aracıdan veya yalnızca belirli konulara (Topic) abone olarak bilgi alır veya kabul eder. Ayrıca aracıya belirli konu mesajlarını da yayınlayabilirler. Tüm cihazlar, aracı aracılığıyla birbirleriyle iletişim kurar. Konular, gönderilebilecek mesajların türünü sınıflandırır. İstemciler belirli bir konuya abone olurlar ve yalnızca bu konulardan mesajlar alırlar. Aracı bu mesajları alır ve onları o konuya abone olan diğer cihazlara iletir. MQTT'de üç farklı QoS (Hizmet kalitesi) türü mevcuttur:

- ✓ QoS0: Aracıdan gelen herhangi bir geri bildirimden bağımsız olarak mesajlar bir kez gönderilir.
- ✓ QoS1: Aracıdan bir onay alana kadar mesajlar tekrar tekrar gönderilir.
- ✓ QoS2: Gönderilen her mesaj için aracı bir onay mesajı geri gönderir.

MQTT, boyut ve veri gücü iletimi açısından hafiftir ve bu nedenle çok sayıda cihazda mevcuttur. MQTT, verilerini esas olarak TCP/IP protokolü aracılığıyla iletir. Şekil 2.3 [68], MQTT haberleşme modelini göstermektedir.




**Şekil 2.3.** MQTT haberleşme modeli.

#### 2.1.1.1. MQTT-SN

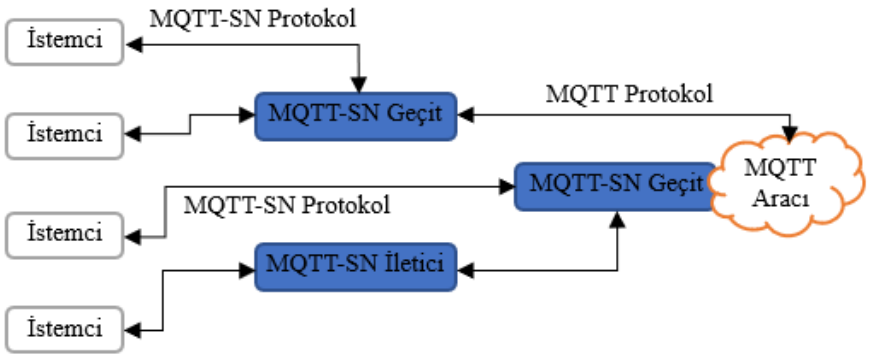
MQTT-SN (Algılayıcı ağları için MQTT) [69], kablosuz ağlarda çalışmak ve mümkün olduğunca MQTT ile aynı şekilde çalışmak üzere özel olarak tasarlanmıştır. Aynı yayınlama/abone olma modelini kullanır ve MQTT'nin bir sürümü olarak kabul edilebilir. MQTT-SN, taşıma protokolü UDP kullanmasına olmasına rağmen mümkün olduğunca MQTT ile aynı tasarıma sahiptir. Bu bakımdan MQTT-SN, mesaj gönderip alabilmesi için genellikle aracıyla bağlantı kurulmasını gerektirir. Bu bağlantı aslında sanal bir bağlantıdır. MQTT-SN mimarisi üç elemandan oluşmaktadır: MQTT-SN istemci, MQTT-SN geçit ve MQTT-SN iletici (Forwarder). MQTT-SN istemcileri, MQTT-SN protokolünü kullanarak bir MQTT-SN geçit aracılığıyla kendilerini bir MQTT sunucusuna bağlar. MQTT-SN geçit, bir MQTT sunucusuyla entegre olabilir veya olmayabilir. Bağımsız bir geçit olması durumunda, MQTT sunucusu ile MQTT-SN geçit arasında MQTT protokolü kullanılmaktadır. Ana işlevi, MQTT ve MQTT-SN arasındaki çeviridir. MQTT ve MQTT-SN arasındaki temel farklar şunlardır:

- Mesaj yükünün boyutu MQTT-SN'de küçülmüştür.
- UDP'yi taşıma protokolü olarak kullanarak kalıcı bağlantı ihtiyacını ortadan kaldırma.

MQTT-SN'nin iki ağ geçidi (Gateway) türü vardır:

- Transparent (Şeffaf) bir ağ geçidi, her MQTT-SN bağlantısının karşılık gelen bir MQTT bağlantısına sahip olmasıdır. Bu, uygulanması en kolay türdür.

- Aggregation (Toplama) ağ geçidi, birden çok MQTT-SN bağlantısını tek bir MQTT bağlantısı ile paylaşmaktadır. Şekil 2.4 [69], MQTT-SN protokol mimarisini göstermektedir.




**Şekil 2.4.** MQTT-SN protokol mimarisi.

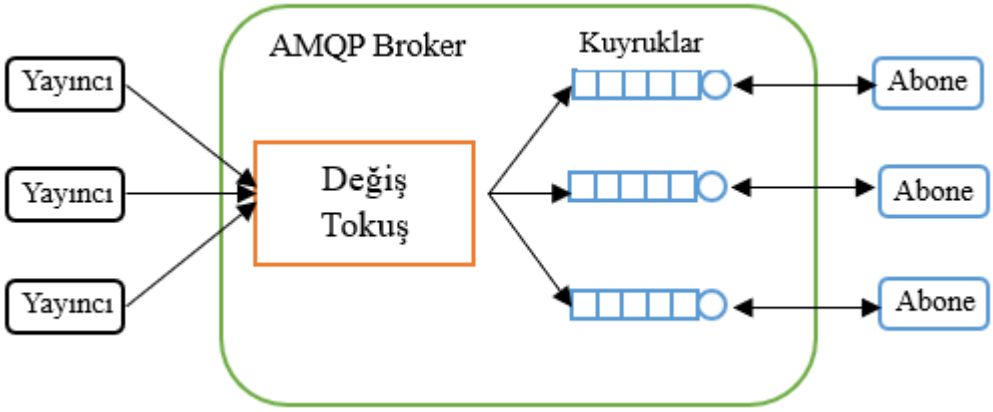
### 2.1.2. AMQP

Advanced Message Queuing Protocol (AMQP) [70], çeşitli uygulamalar ve şirketler arasında iş mesajlarını aktarır. Bu protokol, özellikle IOT uygulamaları için oluşturulmamıştır, ancak nesnelerin internetinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ancak mesaj iletişiminin aktarılmasında etkili bir şekilde çalışır. AMQP, sistemi birbirine bağlar, gerekli bilgilerle sisteme hizmet eder ve gerekli hedeflere ulaşmak için bilgileri iletir. AMQP protokolünün tamamını yöneten üç bölüm vardır:

Exchange: Yayıncılardan gelen mesajları alır ve müsaitlik durumuna göre bu mesajları mesajlaşma kuyruklarına yönlendirir.

Message Queue: Bu mesajları bir uygulama tarafından kullanıma alınana kadar veri tabanlarında saklar.

Bağlama: Bir Exchange ve Message Queue arasındaki ilişkiyi ayırt eder ve mesaj yönlendirme kriterlerini verir. Şekil 2.5 [71], AMQP publish/subscribe mekanizmasını göstermektedir.

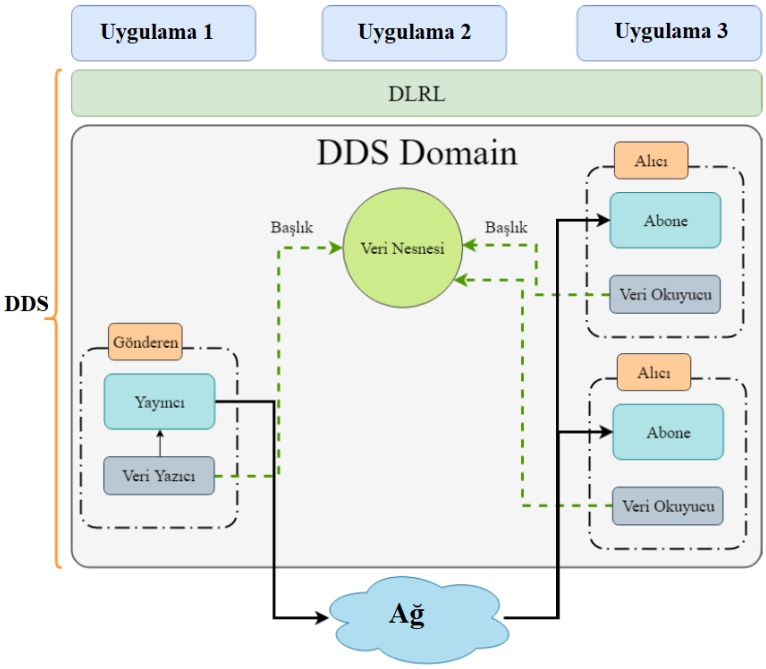



**Şekil 2.5.** AMQP publish/subscribe mekanizması.

### 2.1.3. DDS

Data Distribution Service (DDS) [72] protokolü, bir ağdaki veri tabanları ve kullanıcı uygulamaları arasında bir köprü görevi görür ve bu nedenle bir ara katman protokolüdür. Bu protokol, bir sistemin parçalarını bir araya getirir. Protokol düşük bilgi işlem verisi kullanır, oldukça verimli ve güvenilirdir ve mimarisi son derece genişletilebilirdir. DDS bir ara katman yazılımı olduğundan, görevi etkin iletişim ve kolay veri paylaşımını sağlamaktır. Yorucu ve kafa karıştırıcı iletişim yollarını yönetme işini halleder ve geliştiricilerin uygulamaları oluşturmaya odaklanmasına olanak tanır.

DDS, asıl amacı M2M (Makineden makineye) iletişim olan hayati bir protokoldür. Veri alışverişi, yayınla-abone ol metodolojisi aracılığıyla gerçekleşir. DDS veri merkezlidir ve bu nedenle nesnelerin interneti teknolojisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.6 [72], DDS kavramsal modelini göstermektedir.

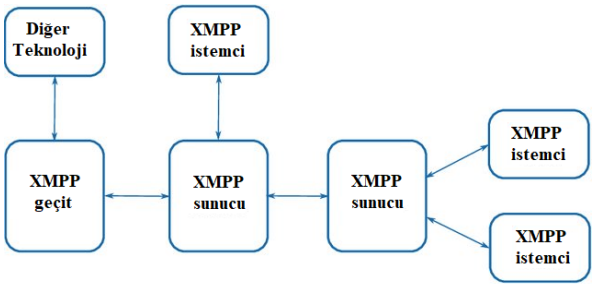



**Şekil 2.6.** DDS kavramsal model.

### 2.1.4. XMPP

Extensible Messaging and presence protocol (XMPP) [73] protokolü, ölçeklenebilirliği nedeniyle uzun mesafeli mesajlaşma için geçerlidir ve insan varlığını veya insan müdahalesini içerir. XMPP, genişletilebilir biçimlendirme dili olan XML'den kaynaklanır ve XML, web sayfaları oluşturmak için kullanılan bir protokol olan HTML'den kaynaklanır. Her ikisi de işaretleme dilleridir.

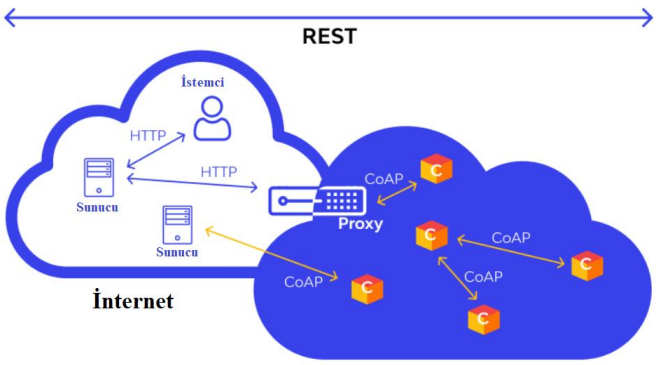
XMPP, genişletile bilirliği nedeniyle birbirleriyle iletişim kurabilen geniş bir kullanım alanına sahiptir. Standart internet iletişim protokolünü kullanır ve bu onu evrensel olarak iletilebilir kılar ve ayrıca HTTP üzerinden iletişim kurar. XMPP ağları, diğer protokollere bağlanmak için ağ geçitleri içerir. TCP bağlantısı üzerinden anlık mesaj aktarımını destekleyecek şekilde tasarlanmıştır. Şekil 2.7 [73], XMPP temel mimarisini göstermektedir.




**Şekil 2.7.** XMPP temel mimarisi

### 2.1.5. CoAP

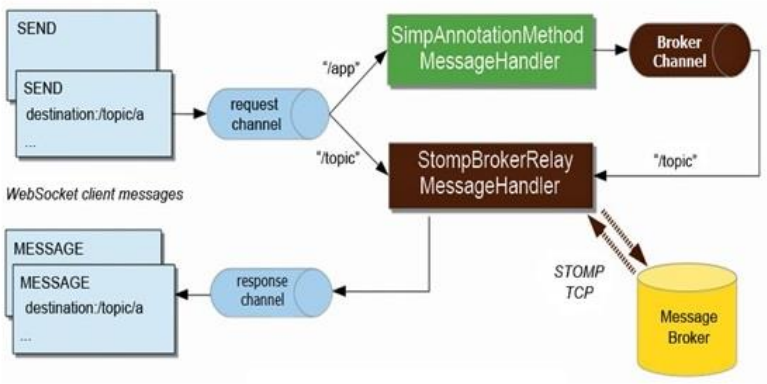
Constrained Application Protocol (CoAP) [74], UDP üzerinde çalışır ve bu nedenle bağlantısız bir protokoldür. Verimli bir protokoldür ve 4 baytlık bir başlığı (Header) vardır. CoAP, HTTP'ye benzer istek/yanıt protokolünü sahiptir. Her istek belirli bir yanıt üretmelidir. HTTP'ye benzer şekilde CoAP, GET, POST ve PUT yöntemlerini destekler. HTTP'den farklı olarak CoAP, bu yöntemleri UDP ile eş zamansız olarak işler. CoAP, HTTP ara yüzünü kolaylaştıracak ve aynı zamanda kısıtlı düğümler ve ağlarla kolayca uyumlu olacak şekilde oluşturulmuştur. CoAP, 4 çeşit mesajı destekler: Confirmable, non-confirmable, acknowledgement ve rest. Confirmable ve non-confirmable mesajlar, isteği ve yanıtı aktarır. Şekil 2.8 [74], CoAP örnek haberleşme mimarisini göstermektedir.




**Şekil 2.8.** CoAP haberleşme mimarisi.

### 2.1.6. STOMP

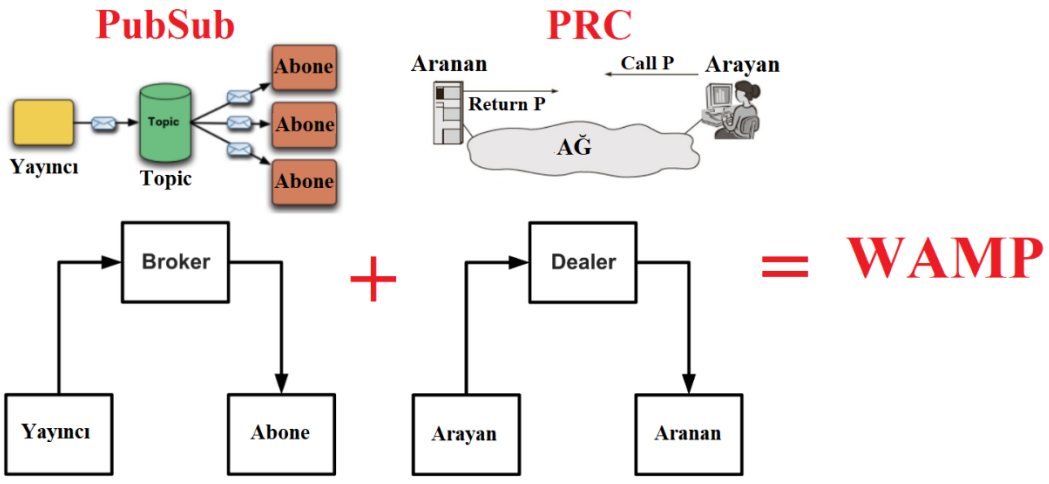
Simple (Or Streaming) Text Orientated Messaging Protocol (STOMP) [75] önceden eskiden Text Oriented Messaging Protocol (TTMP) olarak da bilinen adıyla Message-Oriented Middleware (MOM) ile çalışmak için tasarlanmış basit bir metin tabanlı Protokoldür. STOMP İstemcilerinin protokolü destekleyen herhangi bir mesaj arajı ile konuşmasına izin veren birlikte çalışabilir bir Wire Protocol formatı sağlar. Protokol genel olarak http yapısına benzer bir yapıya sahiptir ve TCP üzerinden çalışır. İstemci-sunucu arasındaki iletişim, birkaç satırdan oluşan bir "çerçeve" aracılığıyla gerçekleşir. Şekil 2.9 [76], örnek STOMP haberleşme mimarisini göstermektedir.




**Şekil 2.9.** STOMP haberleşme mimarisi.

### 2.1.7. WAMP

Web Application Messaging Protocol (WAMP) [77], açık uygulama düzeyinde bir protokoldür. İki çeşit mesajlaşma modeli sağlamaktadır: Routed Remote Procedure Calls (PRC) ve yayımcı (Publish) & abone (Subscribe). Mesaj kodlaması için farklı sertleştiriciler kullanır. WebSocket alt protokolü, Raw TCP Socket, Unix Domain soketi gibi farklı aktarımlar üzerinden çalışabilir. WAMP, bileşen ve mikro hizmet tabanlı uygulamaların tüm mesajlaşma gereksinimleri için kullanılır, teknoloji yığını karmaşıklığını ve ek yükü azaltır, uygulamaların güvenebileceği yetenekli ve güvenli bir temel sağlar. Şekil 2.10 [77], WAMP mesajlaşma mimarisini göstermektedir.

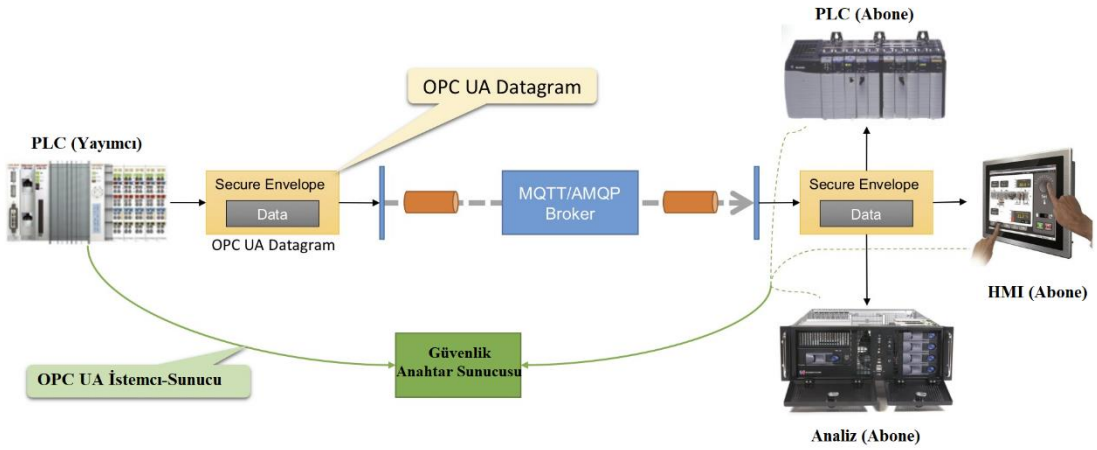



**Şekil 2.10.** WAMP mesajlaşma mimarisi.

### 2.1.8. OPC UA

OPC Unified Architecture (OPC UA) [78], endüstriyel otomasyon için kullanılan ve OPC Foundation tarafından geliştirilen bir makineden makineye iletişim protokolüdür.

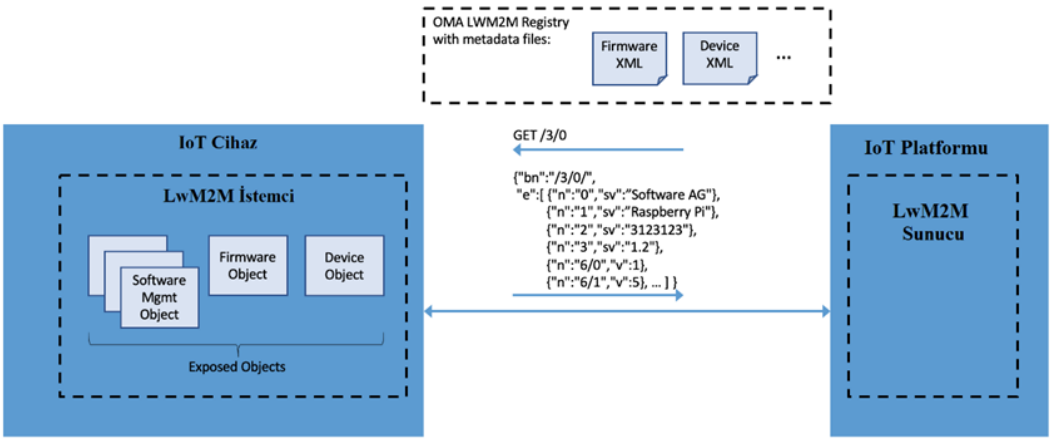
OPC UA, bireysel OPC Classic özelliklerini genişletilebilir bir çerçeveye entegre eden, platformdan bağımsız hizmet odaklı bir mimariye sahiptir. OPC UA, güvenli ve platformdan bağımsız bir standart kullanarak tüm cihazları, otomasyon sistemlerine ve yazılım uygulamalarına entegre edebilmek için endüstriyel bağlantıyı basitleştirir. OPC UA'yı bulut aracılığıyla IoT'ye bağlayarak cihaz tanılama, varlık yönetimi, izleme, raporlama ve diğer uygulamaların çalışmasını mümkün kılar. Şekil 2.11 [78], OPC UA örnek haberleşme diyagramını göstermektedir.




**Şekil 2.11.** OPC UA örnek haberleşme diyagramı.

### 2.1.9. LwM2M

Lightweight M2M standard (LwM2M) [79], Open Mobile Alliance tarafından geliştirilen LwM2M hala oldukça genç bir protokoldür. LwM2M ilk olarak Şubat 2017'de tanıtıldı. LwM2M, CoAP'a dayalıdır ve nesnelerin nnternetinde cihaz yönetimini basitleştirmeyi ve standartlaştırmayı amaçlar. Bu nedenle yalnızca mesajlaşma için tasarlanmamıştır, aynı zamanda cihaz yönetimi için de öğeler içerir. Cihaz ve platform arasındaki bilgi alışverişi için LwM2M, ilgili cihaz üreticisinden bağımsız standartlaştırılmış bir veri modeli kullanır. Model hiyerarşik olarak üç nesne düzeyine bölünmüştür: Nesne, nesne örneği ve kaynak. Şekil 2.12 [79], LwM2M örnek iletişim modelini göstermektedir.




**Şekil 2.12.** LwM2M örnek iletişim modeli.

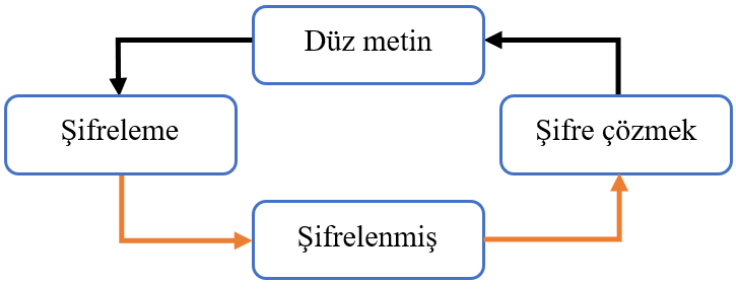
Tablo 2.2, IoT 'de yaygın olan mesajlaşma protokoller karşılaştırmasını kullanılan amaç, mimariler, özelikler, tanımlanmış roller, ve keşif açısından karşılaştırmaktadır.

**Tablo 2.2.** IoT 'de yaygın olan mesajlaşma protokoller karşılaştırması.

| Protokol | Ana amaç | Tanımlanmış roller | Mimariler | Keşif | Gerçek zamanlı | Spesifik özellikler |
|---|---|---|---|---|---|---|
| MQTT | M2M ve IoT küçük kod ayak izi, sınırlı bant genişliği ve yüksek gecikmeli ağlar | Yayımcı, abone, broker | İstemci-broker-istemci | Konular | Kısmi | Güvenilir kuyruk |
| MQTT-SN | Kısıtlı cihazlar | Yayımcı, abone, broker | İstemci-broker-istemci | Konular, ağ geçidi | Kısmi | Sınırlı yük boyutu |
| CoAP | Kısıtlı cihazlar, Kayıplı ağlar | Sunucu, istemci, pub/subm mekanizma | P2P, istemci-sunucu, master-slave | Kaynaklar | Evet | RESTful |
| STOMP | Basit veri alışverişi | Yayımcı, abone, sunucu | İstemci-m-sunucu-istemci | -- | Kısmi | Uygulanması kolay |
| XMPP | Genelleştirilmiş XML verilerinin yönlendirmesi | İstemci, sunucu | İstemci-m_router-istemci | İstemciler | Sınırlı | Kullanıcının listesi ve iletişim durumu |
| WAMP | Mesajlaşma ve RPC | Yayımcı, abone, broker, aranan, arayan, dealer | İstemci-m_router-istemci, İstemci-RPC_router-istemci | Konular ve RPC | Evet veya kısmen | Farklı serileştiriciler kullanır |
| AMQP | Kurumsal ortamlar | Yayımcı, abone, broker | İstemci-m_router-istemci, İstemci-broker-istemci | Veri alışverişi | Kısmi | Tek bağlantıda birden çok bağlantı |
| LwM2M | Genel M2M iletişimi | İstemci, sunucu | İstemci, sunucu | Cihazlar | Evet veya kısmen | İletişim modeli CoAP yöntemlerine dayanmaktadır |
| OPC UA | Endüstriyel uygulamalar | İstemci, sunucu, yayımcı, abone | İstemci-sunucu, yayımcı- abone, sunucular-aggregatorclients, p2p, | Uygulama profilleri, nesne yöntemleri ve değişkenler | Evet veya kısmen | Alana özgü bilgi modelleri |

## 3. ŞİFRELEME ALGORİTMALARI

Son zamanlarda uygarlığın ilerlemesi ile tüm dünyamız internete ve uygulamalarına (İletişim, veri iletimi, dosyalar, videolar vb.) büyük ölçüde bağımlıdır. Bu verilerin internet üzerinden iletilmesi sırasında, verilerin kopyalanmasını ve bu verilerin izinsiz veya yetkisiz kişiler tarafından yeniden dağıtılmasını önlemek için koruma yöntemlerine ihtiyaç vardır. Ağ güvenliği, verileri güvenli ve saldırılara karşı dirençli hale getirmek için mesaj dönüştürme bilimi olan kriptografi ile gerçekleştirilebilir. Bu yöntem, bir mesajın içeriğinin çok gizli bir şekilde iletilmesini ve değiştirilmemesini sağlamak için kullanılır. Şifrelemenin ana konsepti, verileri gizli kodla kodlamak ve eğer ele geçilirse bile bilgisayar korsanları veya yetkisiz kişiler için anlaşılmaz hale getirmektir. Kriptografi, milyarlarca insan tarafından, çoğu kullandıklarının farkında olmasalar bile, verileri ve bilgileri korumak için evrensel olarak düzenli olarak kullanılmaktadır. Kriptografinin tarihsel kökleri, eski Mısırlıların "gizli" hiyeroglifleri kullandığı MÖ 2000 yılına kadar uzanmaktadır. Kriptografinin diğer tarihsel kanıtları, antik Yunanistan'daki gizli yazıları veya antik Roma'nın ünlü Sezar şifresini içerir. Şifreleme uygulamalar bilgisayar şifrelerinde, finansal işlemlerde, e-ticaret ve birçok farklı ortamda kullanılmaktadır. Kriptografi, verileri yalnızca hırsızlıktan veya değişiklikten korumakla kalmaz, aynı zamanda kullanıcı doğrulaması için de kullanılabilir. Şekil 3.1 [80], kriptografi mekanizmasının genel işleyişini göstermektedir.




**Şekil 3.1.** Kriptografi prosedürü.

Yaygın olarak kullanılan üç tür şifreleme planı vardır: Gizemli anahtar şifreleme (Simetrik), açık anahtar (Asimetrik) şifrelemesi ve karma (Hash) çeşitleri. Kriptografide kullanılan terimler Tablo 3.1'de [80] açıklanmıştır.

**Tablo 3.1.** Kriptografide kullanılan terimler.

| Terim | Açıklaması |
|---|---|
| Anahtar | Sayısal veya alfanümerik bir metindir veya benzersiz bir Şekil olabilir. |
| Düz metin | Gizlice göndermek istediğimiz asıl mesajdır. Düz metin herkesin anlayabileceği bir biçimde yazılır. Mesajın internet üzerinden hedeflenen alıcılara gönderilmeden önce bazı güvenlik önlemlerinin alınması gerekir. |
| Şifreli metin | Kimsenin anlayamayacağı mesaj veya amaçsız bir mesaj, şifreli içerik dediğimiz şeydir. |
| Şifreleme | Şifreleme, düz metni, anlamsız ve rastgele bir bit dizisi gibi görünen şifreli metne dönüştürme işlemidir. |
| Şifre çözmek | Şifreli metni tekrar düz metne dönüştürme işlemine şifre çözme denir. |
| Kriptanaliz | Kriptografinin nasıl tersine çevrileceğinin incelenmesidir. Kriptosistem bilgisi olmadan mesajların şifresini çözmekle ilgilenir. |
| Kriptoloji | Kriptanaliz ve kriptografi çalışması kriptoloji olarak bilinir. |
| Kriptosistem | Şifreleme veya şifre çözme algoritması uygulayarak düz metni şifreli metne veya şifreli metni düz metne dönüştüren bir sistemdir. Şifreleme ve şifre çözme algoritmaları için anahtar üretimi de bir şifreleme sisteminin parçasıdır. |
| Cipher | Şifreleme sisteminde kullanılan bir algoritmadır. |

## 3.1. Kriptografi Çeşitleri

### 3.1.1. Simetrik Anahtar Şifreleme

Simetrik anahtar şifrelemesi, mesajları şifrelemek ve şifresini çözmek için gönderici ve alıcı tarafından tek ortak anahtarın kullanıldığı bir şifreleme türüdür. Bu sistem aynı zamanda özel veya gizli anahtar kriptografisi olarak da bilinir. AES (Advanced Encryption System), yaygın olarak kullanılan bir simetrik anahtar şifreleme yöntemidir. Simetrik anahtar sistemi, şifreleme ve şifre çözme işlemi için yalnızca tek bir anahtar olduğundan, iki tarafın gizli bir şekilde anahtarı değiş tokuş etmesi gerektiği gibi önemli bir dezavantaja sahiptir. DES, Triple DES, RC2, RC4, RC5, IDEA, Blowfish, Stream cipher, vb. yaygın olarak kullanılan simetrik anahtar şifreleme tekniklerinden bazılarıdır [80].

### 3.1.2. Asimetrik Anahtar Şifreleme

Aynı zamanda açık anahtarlı şifreleme olarak da adlandırılır. Bilgi aktarımı için farklı türde bir koruyucu yöntem kullanır. Bu sistemde her kullanıcı şifreleme ve şifre çözme işlemi için iki anahtar veya bir çift anahtar (Özel anahtar ve genel anahtar) kullanır. Özel anahtar her kullanıcıyla gizli tutulur ve genel anahtar ağ üzerinden dağıtılır, böylece herhangi bir kullanıcıya mesaj göndermek isteyen herkes bu ortak anahtarları kullanabilir. Açık anahtar herkes tarafından bilinse bile, amaçlanan alıcı, yalnızca özel anahtarı bildiği için kodu çözebilir. Simetrik anahtardan daha güvenlidir. RSA, en yaygın olarak kullanılan asimetrik anahtar şifrelemesidir. DSA, PKC'ler, Eliptik Curve teknikleri vb. yaygın asimetrik anahtar şifreleme türleridir [80].

### 3.1.3. Hash

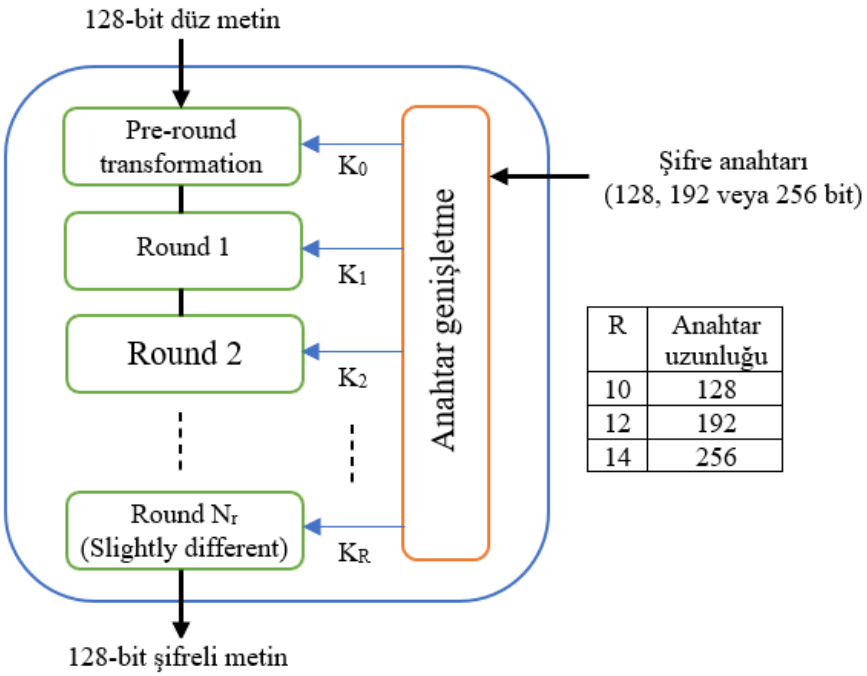
Hashing, herhangi bir rastgele boyuttaki veriyi bir hash fonksiyonu kullanarak sabit uzunluklu bir değere eşleme işlemidir. Teknik olarak, hashing tersine çevrilebilir, ancak şifresini çözmek için gereken hesaplama gücü, şifre çözmeyi imkânsız hale getirir. Hashing'in kullanımlarından biri, büyük miktarda veriyi karşılaştırmaktır. Hash değerlerinin karşılaştırılması, daha özlü oldukları için büyük veri yığınlarından çok daha kolaydır. Hash, dijital imzalarda ve veri tabanlarında da verilerin tekrarlanmasını önlemek için rastgele dizeler oluşturmak için kullanılır. Hash işleminin tersine çevrilmesi son derece olanaksız olduğundan, parolalarda hash algoritmaları kullanılacak, parolayı daha kısa ve saldırganlar tarafından keşfedilemez hale getirir [80].

## 3.2. Hafif Siklet Şifreleme Algoritmaları

Hafif şifreleme, bellek kullanımını, güç tüketimini optimize etmeye ve yeterli düzeyde güvenlik sağlamaya odaklanan tercih edilen bir şifreleme yöntemidir. Hafif şifreler donanım ve yazılım platformlarında uygulanabilir. İlki (Donanım), çalışan döngülerin ve bellek alanı sayısını azaltmaya odaklanır ve diğeri (Yazılım) enerji tüketimini ve bellek kullanımını azaltmayı hedefler. Güç ve hız açısından donanım çözümü daha iyi sonuçlar sağlar. Literatürü araştırdığımızda, üç grup hafif siklet şifre görebiliriz; Substitution-Permution Network (SPN), Feistel Ağları ve diğer tasarımlar. Feistel, SPN'nin asimetrik yapısına karşı simetrik (Şifreleme ve şifre çözme için aynı anahtar) kullanır. SPN'nin round fonksiyonu (F) tersine çevrilebilir olmalıdır ve Feistel ağının

aksine nispeten daha yüksek güvenlik sağlar. Diğer yandan, SPN daha fazla kaynak tüketmektedir. Bahsedilen şifrelerin doğal özelliklerinin birleştirilmesi, hybrid (Karışık) adı verilen yeni blok şifre kategorilerinin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Bellek alanı (Footprint), hafif bir blok şifresi tasarlamanın en büyük zorluklarından biridir, bu nedenle, blok şifrelerinin çoğunda S-Box yoktur veya küçük (Örneğin 4-bayt) S-Box kullanılmıştır. S-Box, saldırılara karşı direnmede kilit rol oynar. Bu bölümde, tezde kullanılan hafif siklet şifrelerin kısa bir incelemesini sunulmuştur. Tablo 3.2, hafif siklet şifreler farklı kriterler açısından karşılaştırmaktadır.

AES [81]- Farklı şifreleme paketlerinde bulunan bir SPN şifresidir. Bu şifrenin S-Box dörde dört bir matristir. Anahtar genişletmesinden sonra, tercih edilen anahtar uzunluğuna bağlı olarak, düz metin üzerinde round fonksiyonu uygular ve dört işlemden oluşmaktadır; SubBytes (Dört baytlık bir sözcük, SubByte dönüş değeridir), ShiftRows (Durum satırları, farklı uzaklıklar üzerinden çevrimsel olarak kaydırılır.), MixColumns (Durum sütunları, GF (28) üzerinden polinomlar olarak ifade edilir ve bir sabitle modulo x4 + 1 ile çarpılır. polinom c(x)) ve AddRoundkey (Basit bir bit düzeyinde EXOR kullanarak, duruma bir round anahtarı uygulanır). Şekil 3.2 [81] AES şifreleme şemasını göstermektedir.

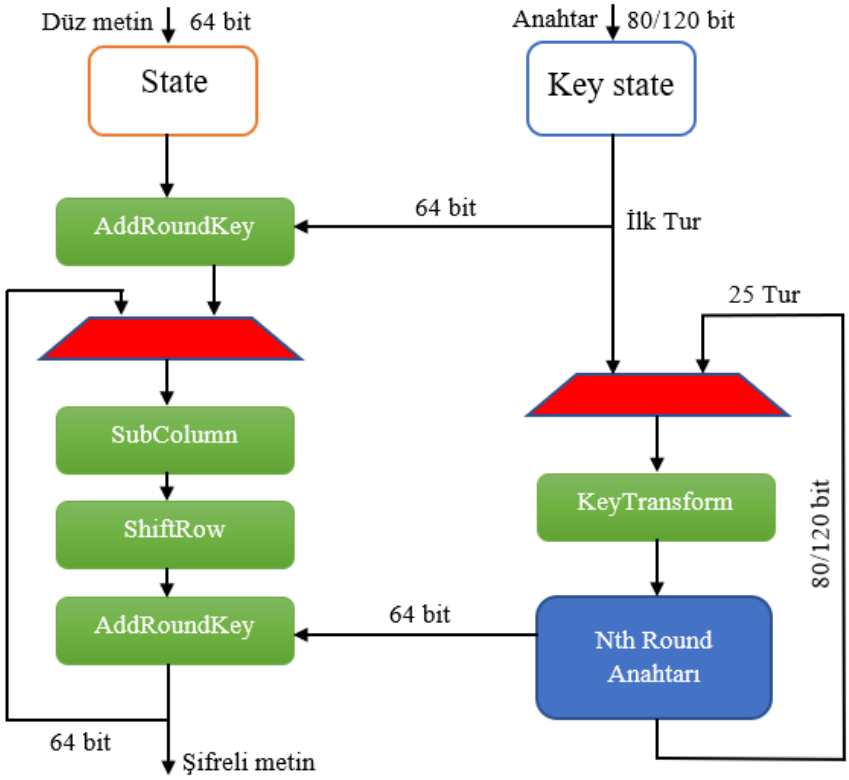



| R | Anahtar uzunluğu |
|---|---|
| 10 | 128 |
| 12 | 192 |
| 14 | 256 |

**Şekil 3.2.** AES şifreleme şeması.

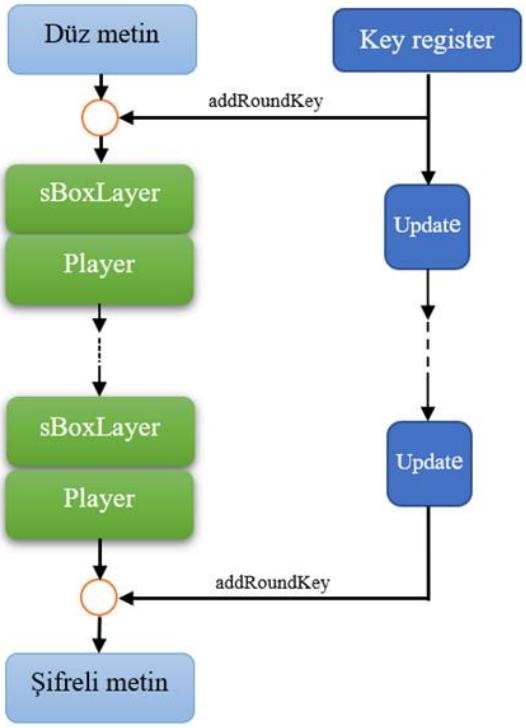
RECTANGLE [9]- Donanım ve yazılım ortamlarına uygundur ve SPN yapısına sahiptir. Bu şifrede şu adımları içeren 25 tur vardır: AddRoundKey (Ara duruma

uygulanan basit bir bitsel-XOR (Yuvarlak alt anahtarın), SubColumn (Aynı sütundaki dört bite S-Box paralel uygulaması), ShiftRow (Farklı ofsetler üzerinden her satıra bir sola döndürme uygulanmaktadır). On iki temel mantıksal işlem dizisi bu şifre için S-Box oluşturmaktadır. P-katmanı üç rotasyondan oluşmaktadır. Şekil 3.3 [9] RECTANGLE şifreleme işlemini gösteriyor.



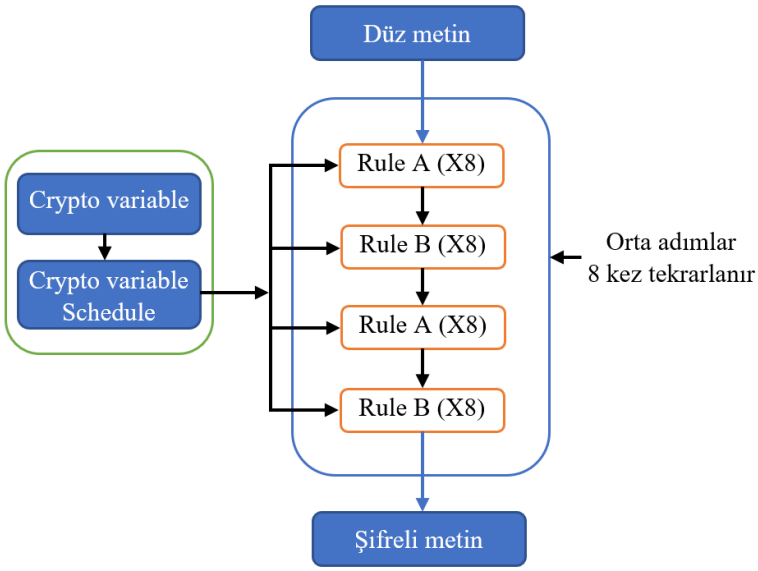

**Şekil 3.3.** RECTANGLE şifreleme işlemi.

PRESENT [82]- Altyapısından ilham alan birçok blok şifre vardır. Bit odaklı bir SPN yapısıdır. Round anahtarlar oluşturduktan sonra, algoritma her bir 31 tur için şu adımları uygular: addRoundKey, sBoxLayer, pLayer. Dört bite dört bit S-Box kullanır ve donanım platformlarında kullanılması önerilir. PRINCE; FX yapısına dayanmaktadır ve bu algoritmanın anahtar zamanlama mekanizması şu şekilde tanımlanmaktadır; 64 bitlik anahtarlarından ikisini, 128 bitlik whitening anahtardan elde eder ve şifreleme sırasında üçüncü anahtarı dahili durumda XOR'lanır. Her tur şu adımları birleştirir: Anahtar ekleme, bir S-Box katmanı, doğrusal katman, round sabit ekleme. Şekil 3.4 [82] PRESENT hafif siklet şifresinin temel şifreleme şemasını göstermektedir.



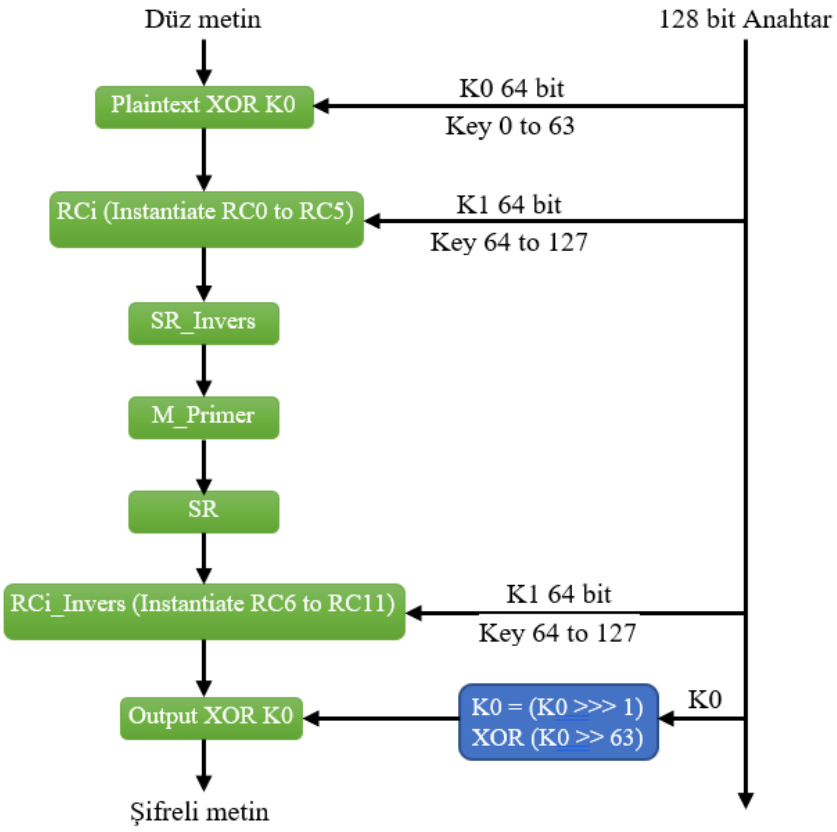

**Şekil 3.4.** PRESENT hafif siklet şifresinin temel şifreleme şeması.

Skipjack [65]- 80 bitlik anahtar uzunluğundan dolayı yaygın saldırılara karşı zaaf göstermektedir (Anahtar boyutu nedeniyle). Skipjack'in blok uzunluğu 64 bit ve tur sayısı 32'dir ve dengesiz (Unbalanced) bir Feistel ağı olarak sınıflandırılır. 8x8 S-Box sahip basit bir şifreleme algoritmasıdır. Şekil 3.5 [65] Skipjack şifreleme işlemini gösteriyor.



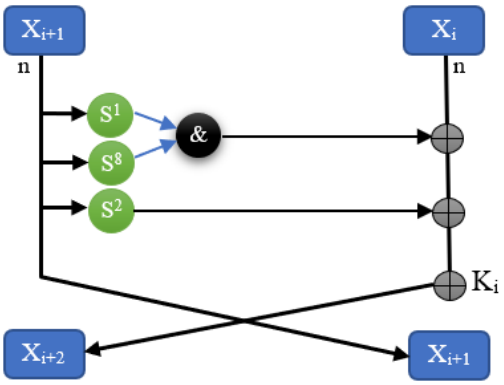

**Şekil 3.5.** Skipjack şifreleme işlemi.

PRINCE [83]- FX yapısına dayanmaktadır ve bu algoritmanın anahtar zamanlama mekanizması şu şekilde tanımlanır; 64 bitlik anahtarlarından ikisini, 128 bitlik whitening anahtardan elde eder ve şifreleme sırasında üçüncü anahtarı dahili durumda XOR'lanır. Her tur şu adımları birleştirir: Anahtar ekleme, bir S-Box katmanı, doğrusal katman, round sabit ekleme. Şekil 3.6 [83] PRINCE algoritmanın şifreleme işlemini göstermektedir.



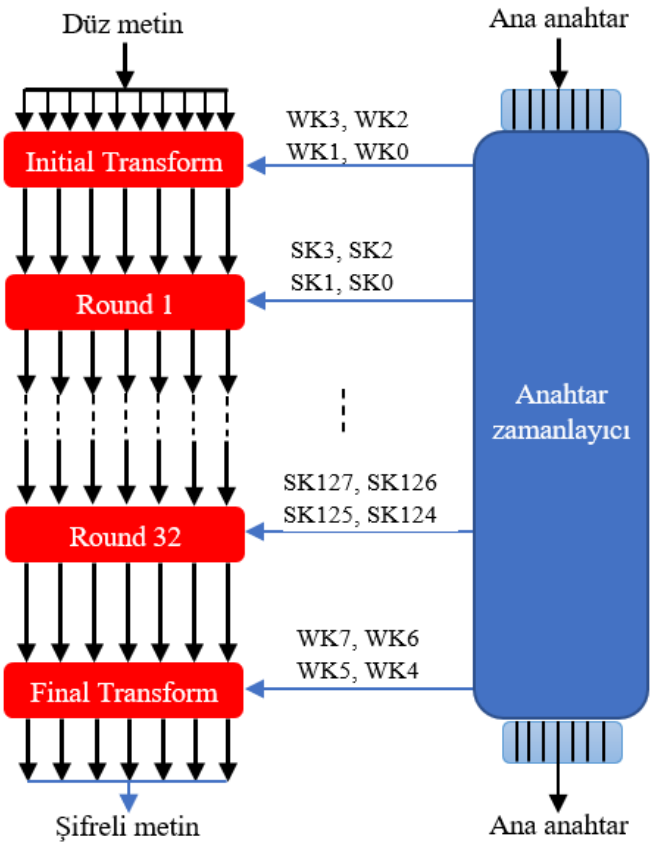

**Şekil 3.6.** PRINCE şifreleme işlemi.

SIMON [84]- Dengeli bir Feistel yapısına sahiptir ve donanım odaklı sistemlerde kullanım için optimize edilmiştir. Bitsel XOR, bitsel AND ve sola dairesel kaydırma round fonksiyonu oluşturmak için kullanılmaktadır. Anahtar zamanlaması dengeli olabilir veya olmayabilir. Şekil 3.7 [84] SIMON round fonksiyon yapısını göstermektedir.




**Şekil 3.7.** SIMON round fonksiyonu.

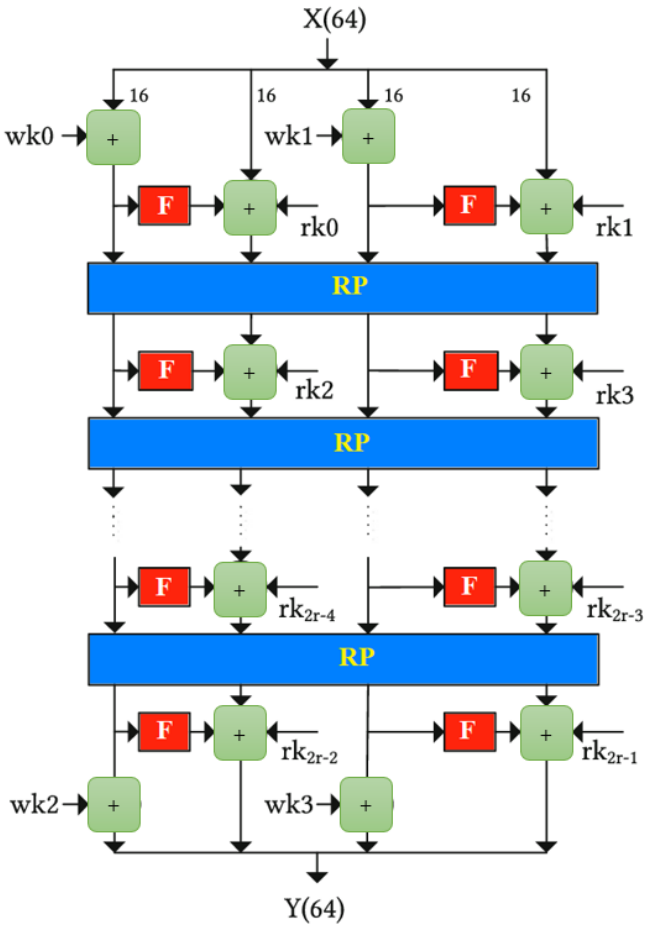
HIGHT [85]- ARX tabanlı genelleştirilmiş bir Feistel ağıdır. HIGHT, basit işlemlere dayanmaktadır: XOR, ek mod 28, bit yönünde döndürme (Soldan). Anahtar zamanlaması için iki algoritma vardır: WhiteningKeyGeneration ve SubKeyGeneration. Donanım ve yazılım platformları için uygundur. Şekil 3.8 [85] HIGHT algortimanın şifreleme şemasını göstermektedir.




**Şekil 3.8.** HIGHT şifreleme şeması.

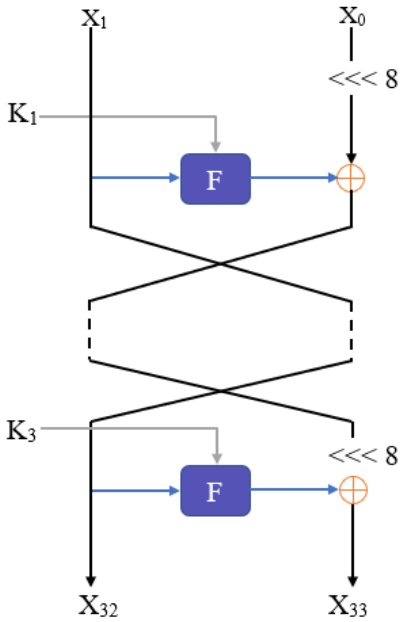
Piccolo [11]- Donanım odaklı bir blok şifredir ve anahtar boyutları Piccolo-80 ve Piccolo-128'de mevcuttur. Difüzyon tabakası için özel yarım kelime permütasyon ve

whitening tekniği kullanmaktadır. 4x4 S-Box'a sahiptir ve sonraki işlemleri kullanılarak uygulanmaktadır: Dört NOR, üç XOR ve bir XNOR geçit. Şekil 3.9 [11] Piccolo algortmanın şifreleme şemasını göstermektedir.



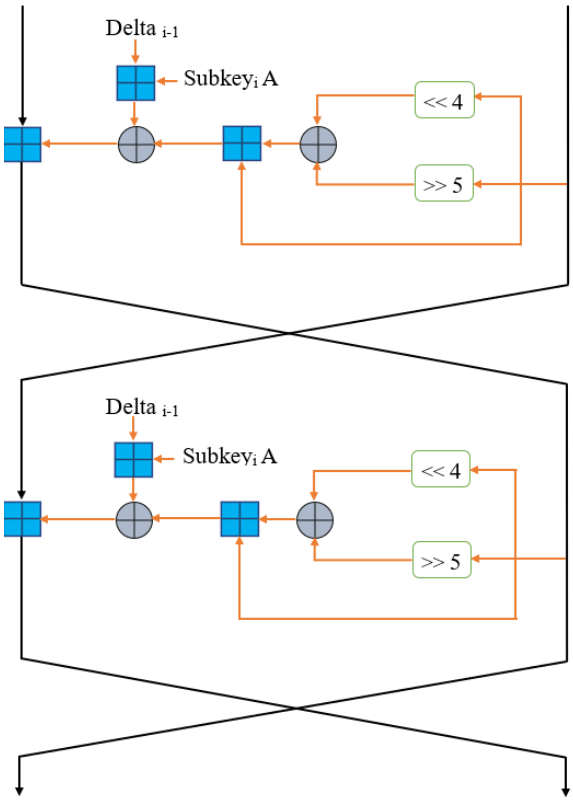

**Şekil 3.9.** Piccolo şifreleme şeması.

LBlock [86]- Yazılım ve donanım ortamlarında uygulama yeteneğine sahiptir. LBlock'ta 4x4 bir S-Box var. Anahtar zamanlama mekanizması iki ek S-Box uygulamaktadır. Şifreleme işlemi 32 turlu yinelemeli bir yapı içerir ve şifre çözme, şifrelemenin ters işlemidir. Şekil 3.10 [86] LBlock şifreleme işlemini göstermektedir.



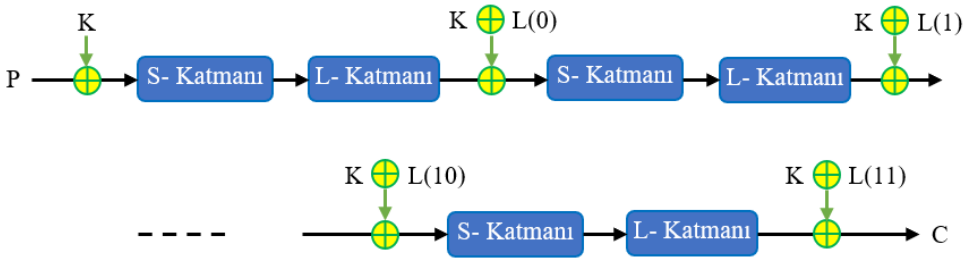

**Şekil 3.10.** LBlock şifreleme işlemi.

TEA ve halefi XTEA [11]- Feistel mimarisine sahiptir. Her iki Şifre de 128 bit anahtar uzunluğuna ve 64 bit blok uzunluğuna sahiptir. TEA, karmaşık olmayan bir anahtar zamanlama mekanizmasını temsil eder. XTEA ile karşılaştırıldığında, shift işlemlerin yeniden düzenlenmesi, XOR'ler ve ekleme işlemleri gibi bazı iyileştirmeler yapılmıştır. Ayrıca, bunun için daha karmaşık bir anahtar zamanlama mekanizması kullanılmıştır. Her ikisi de 128 bit anahtar uzunluğu ve 128 bit blok uzunluğa sahipler. Şekil 3.11 [11] XTEA'de bir tur şifreleme şemasını göstermektedir.



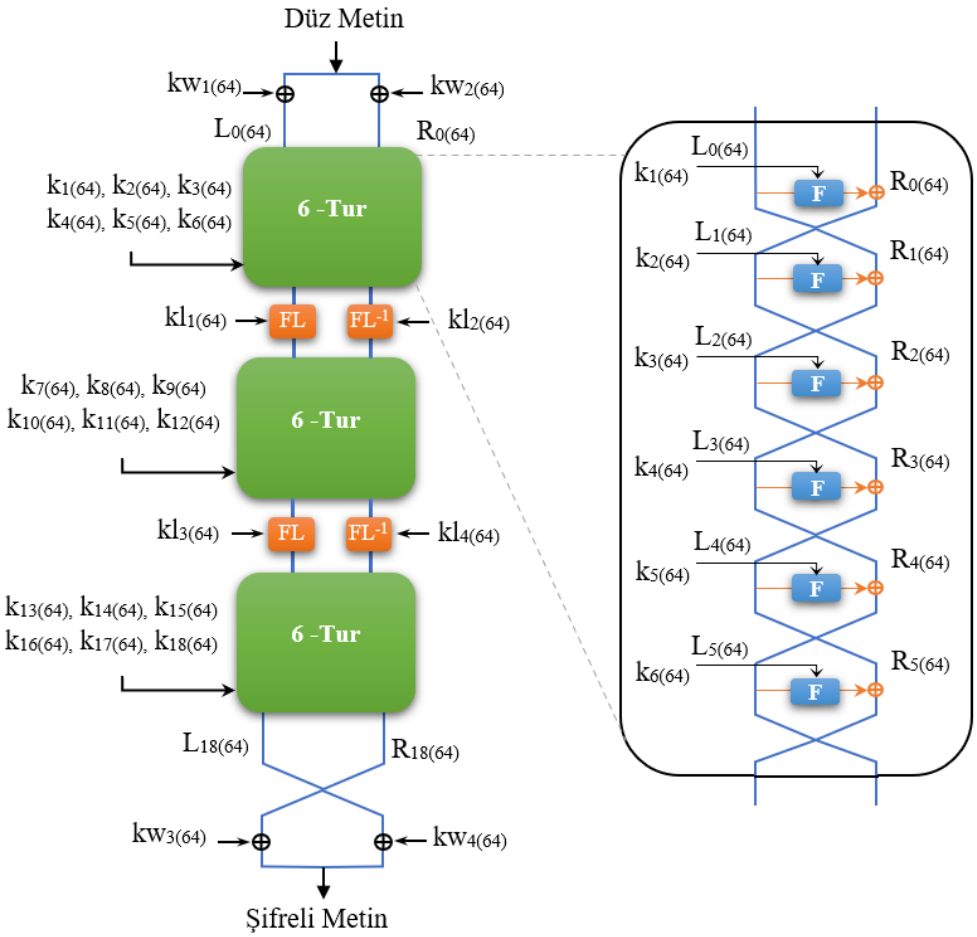

**Şekil 3.11.** XTEA'de bir tur şifreleme şeması.

Fantomas/Robin [87]- Her ikisi 'de LS-tasarım üyesidir ve dahil edici şifre Robin ve dahil edici olmayan şifre Fantomas olarak kategorize edilmiştir. Her iki şifredeki round fonksiyonu şu katmanları içerir: S-Box katmanı, L-Box katmanı ve KC katmanı. Her iki şifrenin S-Box'ı sekize sekiz bit ve L-Box'ı on altıya on altı bitten oluşmaktadır. Şekil 3.12 [87] Fantomas şifreleme işlemini göstermektedir.




**Şekil 3.12.** Fantomas şifreleme işlemi.

Camellia [10]- Şifreyi daha güvenli hale getirmek için şifrelemek ve şifreye engellemek için anahtar whitening tekniğini kullanmaktadır. Ayrıca her altı döngüde bir FL ve $FL^{-1}$ mantıksal fonksiyonlar sisteme dahil edilmiştir. Verimliliği yazılım ve donanım platformlarında dikkat çekicidir. Şekil 3.13 [10] Camellia şifreleme (128-bit anahtar) işlemini göstermektedir.




**Şekil 3.13.** Camellia şifreleme (128-bit anahtar) işlemi.

Hafif siklet şifreler karşılaştırması, Tablo A.3'de sunulmaktadır [13].

**Tablo 3.2.** Tez çalışması ve literatürdeki çalışmaların karşılaştırması (Raspberry Pi 3 ve Arduino Mega 256 için).

| Makale | Platform | Değerlendirme Metrikleri | Algoritmalar | Karşılaştırma yöntemi | Mod |
|---|---|---|---|---|---|
| Gaurav B [88] | ARM 7 LPC2129 | Flash, RAM, Çalışma süresi, iş çıkarma oranı, döngü sayısı | PRESENT, LED, BORON, KLEIN, HUMMINGBIRD2, SIMON, SPECK, PICCOLO, TWINE, CLEFIA | Her algoritmanın blok uzunlukları | Şifreleme |
| Rutuja S [89] | ARM 7 LPC2129 | Hafıza kullanımı, güç tüketim, iş çıkarma oranı ve Çalışma süresi | PRESENT, TWINE, PICCOLO, AES, CLEFIA, NUCLEAR | Her algoritmanın blok uzunlukları | Şifreleme |
| Jaber H [90] | Atmega128 (AVR simülatör) | Güç tüketim ve hafıza kullanımı (Flash ve RAM) | SIMON, SPECK, TWINE, KLEIN, Piccolo | Her algoritmanın blok uzunlukları | Şifreleme |
| Kedar D [91] | Raspberry Pi 3, Beagle Bone Black | CBC ve EBC modlarında çalışma süresi | AES, DES, TDES, Blowfish, Twofish, RC2 | MB büyüklüğünde dosyalar (1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128 MB) | Şifreleme |

**Tablo 3.2. (Devamı)** Tez çalışması ve literatürdeki çalışmaların karşılaştırması (Raspberry Pi 3 ve Arduino Mega 256 için).

| Makale | Platform | Değerlendirme Metrikleri | Algoritmalar | Karşılaştırma yöntemi | Mod |
|---|---|---|---|---|---|
| Michael A [92] | 8-bit mikro denetleyici (4 ve 16 MHZ) | RAM, döngüler, iş çıkarma oranı, enerji | KATAN, TEA, PRESENT, SEA, AES | Her algoritmanın blok uzunlukları | Şifreleme |
| Johann G [93] | StrongARM SA-1100 (200 MHZ) | Flash, SRAM, iş çıkarma oranı | SIMON, SPECK, PRESENT, SEA, AES | Her algoritmanın blok uzunlukları | Şifreleme + Şifre çözmek |
| Miroslav B [94] | Atmel ATmega128RFA1 | Güç tüketim, iş çıkarma oranı, kod boyutu, hafıza (RAM & ROM) alanı | RC6, Rijndael, Serpent, Twofish, XTEA | Her algoritmanın blok uzunlukları | Şifreleme + Şifre çözmek |
| Mickael C [12] | MSP430 | Enerji tüketimi, zaman ve iş çıkarma oranı | XTEA, AES | Yükler (1, 15, 16, 31, 32, 47, 48, 63, 64, 79, 80, 95, 96, 104 bayt) | Şifreleme + Şifre çözmek |
| C.A. Lara N [95] | Qualcomm MSM8926 ve Snapdragon 400 (D2303, D2306) | Döngü sayısı, döngü/bayt, RAM, ROM, birleşik metrik | AES, CLEFIA, DESXL, HIGHT, IDEA, Noekeon, KATAN, KLEIN, KTANTAN, LBlock, LED, MCRYPTON, MIBS, PRESENT, Piccolo, SEA, Skipjack, TEA, TWINE, XTEA | Her algoritmanın blok uzunlukları | Şifreleme + Şifre çözmek |
| S. Kotel [96] | 8-bit AVR ve 16-bit MSP mikro denetleyici | Güç tüketimi, çalışma süresi, iş çıkarma oranı, hafıza kullanımı | AES, PRESENT | Her algoritmanın blok uzunlukları | Şifreleme + Şifre çözmek |
| William D [97] | Xilinx Kintex-7 FPGA | Kod büyüklüğü, RAM, Çalışma süresi, efficiency | SIMON, SPECK, AES, PRESENT | Her algoritmanın blok uzunlukları | Şifreleme + Şifre çözmek |
| Margi [98] | Arduino Uno, MATLB | İş çıkarma oranı, TP/A, döngüler/blok, döngüler/bayt | AES, SIMON, SPECK, PRESENT, LED, TWINE | Her algoritma | Yazılım ve Donanım |
| Deepti S [99] | Intel (R) core (TM) i5-2430M CPU @ 2.40 GHz | Hafıza kullanımı, hız, kayan nokta sayıları karşılaştırması | PRESENT, AES, HIGHT, Klein | Her algoritma | Yazılım |
| M. Razvi [100] | Sim-Panalyzer | Hafıza kullanımı, döngüler/bayt, hız, çalışma süresi | BRIGHT, RoadRunneR, SPECK, HIGHT, SPNRX | Blok şifreler | Şifreleme + Şifre çözmek |
| Lejla [101] | Cadence Encounter RTL Compiler & ModelSIM simülatör | Enerji tüketimi, çalışma süresi, hız | AES, RC5 | Yükler (16, 64, 256, 1024, 8192 bayt) | Şifreleme + Şifre çözmek |
| Ray B [84] | Atmel ATmega128 | Şifreleme time, güç (Statik ve dinamik), enerji | AES, CLEFIA, KLEIN, LED, mCrypton, PRESENT, KATAN | Blok uzunlukları | Şifreleme |
| | | Flash, RAM, hız, enerji | SIMON, SPECK | Blok uzunlukları | Şifreleme |

**Tablo 3.2. (Devamı)** Tez çalışması ve literatürdeki çalışmaların karşılaştırması (Raspberry Pi 3 ve Arduino Mega 256 için).

| Makale | Platform | Değerlendirme Metrikleri | Algoritmalar | Karşılaştırma yöntemi | Mod |
|---|---|---|---|---|---|
| W.K.LEE [102] | ODROID-XU3 | Çalışma süresi, enerji iş çıkarma oranı, güç tüketimi | AES, CLEFIA, SIMON, SPECK, PRESENT | 64 MB düz metin | Şifreleme |
| George H [103] | 8-bit, 16-bit, 32-bit mikro denetleyici | RAM, ROM, gecikme, enerji, iş çıkarma oranı, Yazılım verimliliği | AES, Camellia, IDEA, NOEKEON, KASUMI, GOST, HIGHT, PRESENT, CLEFIA, HB, Piccolo, TEA, XTEA, SEA, mCrypton, MIBS, TWINE, LED, Klein, KATAN, KTANTAN, ITUbee, SIMON, SPECK, PRINTcipher, LBlock, PRINCE, PRIDE, Zorro, Robin, Fantomas, LEA, DES | Blok Anahtar ve Blok Boyutu | Yazılım ve donanım karşılaştırması |
| Lukas [104] | Samsung Galaxy S i9000 | Güç tüketimi, çalışma süresi | Güç tüketimi (AES, DES, TDES), Çalışma süresi (AES, Blosfish, Camellia, CAST 5/6, DES, DESede, GOST28147, IDEA, Noekeon, RC 2/4/5, Rijindal, SEED, Serpent, Skipjack, TEA, XTEA, Twofish) | 64, 128, ve 512-bit mesajlar | Şifreleme + Şifre çözmek |
| Tasnime O [105] | Raspberry Pi 2 ve Arduino UNO | RAM, ROM, çalışma süresi, Saat/döngü | PRESENT, SIMON, SPECK, RECTANGLE, PRINCE, Pride, LBlock | Her algoritmanın blok uzunlukları | Şifreleme + Şifre çözmek, anahtar zamanlama |
| Levent E [106] | STM32F401RE mikro denetleyici | İş çıkarma oranı, RAM&ROM, enerji tüketimi, çalışma süresi | CLEFIA, PICCOLO ve TWINE | 512, 1024, 2048, 3072 bayt yükler | Şifreleme |
| Mojtaba A [107] | Atmel ATtiny45 mikro denetleyici | RAM, ROM, enerji tüketimi | TEA, HIGHT, KATAN, KLEIN | Her algoritmanın blok uzunlukları | Şifreleme |
| Murat Ç [108] | Atmel Atmega128 mikro denetleyici | RAM, ROM, çalışma süresi, iş çıkarma oranı | AES, SERPENT, Camellia, Cast5, MARS | Her algoritmanın blok uzunlukları | Şifreleme + Şifre çözmek |

**Tablo 3.2. (Devamı)** Tez çalışması ve literatürdeki çalışmaların karşılaştırması (Raspberry Pi 3 ve Arduino Mega 256 için).

| Makale | Platform | Değerlendirme Metrikleri | Algoritmalar | Karşılaştırma yöntemi | Mod |
|---|---|---|---|---|---|
| Pal-Stefan M [109] | S08, S12, S12Z, RL78 D1A, TC1782, TC1797, MSP430, MPC5606B, iMX6, RH850 G3K, RH850 G3M | ROM, çalışma süresi | MD5, SHA1, SHA2, SHA3, Blake2, AES, KATAN, PRESENT, SPECK | 8, 64, 576, 1536, 4096, uzun mesajlar | Şifreleme |
| Tez çalışması | Raspberry Pi 3 ve Arduino Mega 2560 (Atmel ATmega 2560) | RAM, ROM, çalışma süresi, iş çıkarma oranı, enerji tüketimi | AES, PRESENT, LBlock, Skipjack, SIMON, XTEA, PRINCE, Piccolo, HIGHT, RECTANGLE | 16, 64, 128, 256, 512, 1024, 2048 bayt yükler | Şifreleme + Şifre çözmek |

## 3.3. Hafif Şifreleme Algoritmalarının Performans Değerlendirmesi

Bu bölümde Raspberry Pi 3 ve Arduino Mega 256 üzerinde testleri gerçekleştirmek için on hafif siklet şifresi seçilmiştir. Adı geçen iki test cihazı özeliklerinden dolayı IoT projelerinde önde gelen cihazlardır. Algoritmaların seçiminde, blok uzunluğu, anahtar boyutları, popülaritesi, iç yapıları ve yazılım ortamları üzerinde uygulama olanakları kriterleri göz önüne alınmıştır. PRESENT gibi bazı algoritmalar ilk sürümlerde donanım odaklı olsa da daha sonra yazılım platformlarına kurulmak üzere geliştirilmiştir. 128 bitlik blok uzunluğuna sahip algoritmalar (AES hariç), diğer tüm algoritmalar 64 bit uzunluğunda ve anahtar boyutu açısından 80 ve 128 bit anahtar boyutuna sahipler. LBlock ve Skipjack hariç, diğerleri 128 bit anahtar boyutuna sahipler. Tablo 3.3, seçilen on hafif siklet şifre algoritmanın karşılaştırılmasını göstermektedir.

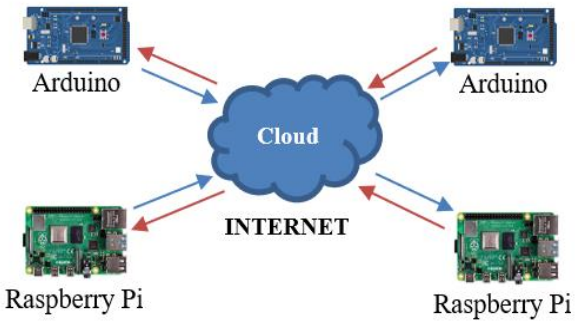
**Tablo 3.3.** Seçili hafif siklet şifrelerin karşılaştırılması.

| Ad | Blok uzunluğu (Bit) | Anahtar uzunluğu (Bit) | Yapı |
|---|---|---|---|
| LBlock | 64 | 80 | Feistel |
| Skipjack | 64 | 80 | Feistel |
| XTEA | 64 | 128 | Feistel |
| HIGHT | 64 | 128 | Feistel |
| Piccolo | 64 | 128 | Feistel |
| SIMON | 64 | 128 | Feistel |
| RECTANGLE | 64 | 128 | SPN |
| PRESENT | 64 | 128 | SPN |
| PRINCE | 64 | 128 | SPN |
| AES | 128 | 128 | SPN |

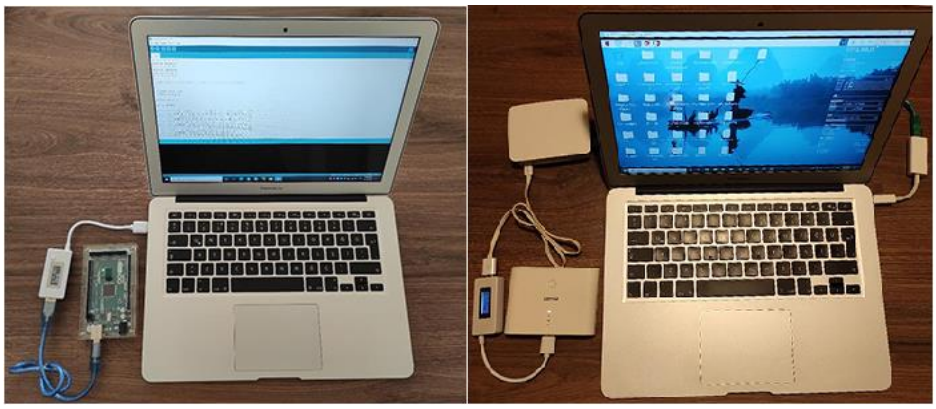
Bahsedilen on blok şifreyi bir IoT platformu üzerinden değerlendirmek için Raspberry Pi 3 ve Arduino Mega 2560 cihazları kullanılmıştır. Şifreli dosya değişim platformu olarak Dropbox bulut hizmeti seçilmiştir. Daha kesin sonuçlar elde etmek için her deney beş kere tekrarlanmıştır. Düz metin, gönderici tarafında bir dosyaya şifrelenir ve dosya buluta aktarılır ve hedefte şifre çözme için cihaz dosyayı buluttan okur ve şifresini çözmeye başlar. Gecikme ve ağ hızı gibi ağ parametreleri testler sırasında değişebileceğinden, buluta yükleme ve indirme sürelerini göz ardı edilmiş ve bu tezdeki tüm ölçülen değerler, gönderici veya alıcıdaki yerel şifreleme ve şifre çözme sürelerine dayanmaktadır. Şekil 3.14, veri alışveriş sisteminin genel bir görünümünü gösterir ve Şekil 3.15, sırasıyla değerlendirilen sistemin donanım düzenini gösterir. Şekil 3.15'te görüldüğü gibi Raspberry Pi 3, 10400 mA bir güç kaynağı (Power bank) ile güç verilmiş ve Arduino Mega, laptop USB portuna bağlanmıştır. Komutları kontrol etmek ve yürütmek için Raspberry Pi ve Arduino ethernet ve USB bağlantı noktaları aracılığıyla MacBook'a bağlanmıştır. Farklı senaryolarda güç tüketimini ölçmek için USB güç ölçer kullanılmıştır. Pi 3, 1.2 GHz hızında çalışır ve 1 GB Ram kullanır ve 64-bit ARM Cortex A53 işlemci ile donatılmıştır. 5V mikro USB veya güç bankası ile çalıştırılabilir. Arduino Mega 2560 ise 16 MHz ATmega2560, 8 bit mikro denetleyici, 256 KB Flash bellek, 8 KB SRAM ve 4 KB EEPROM'a sahiptir. Arduino için önerilen giriş voltajı 7-12V'dir.

$$Akım\ akışı\ (A) * Süre\ (Saniye) = Şarj\ (C) \tag{3.1}$$

$$Şarj\ (C) * Gerilim\ (V) = Enerji\ (J) \tag{3.2}$$




**Şekil 3.14.** Test sistemleri için veri alışverişi şeması.



A B

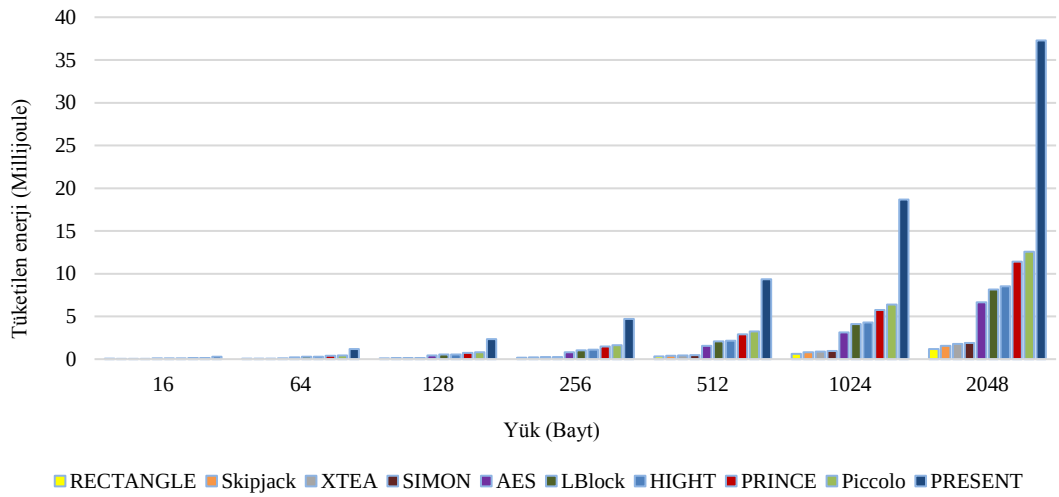
**Şekil 3.15.** Test edilen sistemin donanım düzeni (A, Arduino Mega kullanarak- B, Raspberry Pi kullanarak).

Şekil 3.16 ve Şekil 3.17, her iki cihazın şifreleme işlemi için enerji tüketim davranışını temsil etmektedir. Raspberry Pi 3 ve Arduino Mega 2560, diğer blok şifrelere kıyasla PRESENT algoritması için dikkat çekici şekilde maksimum enerji tüketir. Bunun nedeni, bu blok şifrenin aslında bir donanım dostu olarak tasarlanmış olmasıdır. Tablo 3.4, iki cihaz için tüketilen enerji karşılaştırmasını göstermektedir. İlgili sütunlardaki hafif siklet şifreler, en düşükten en yükseğe doğru sıralanmıştır. XTEA, Skipjack ve RECTANGLE, Raspberry Pi 3 için minimum enerji tüketimine sahiptir. XTEA ve Skipjack'in basit yapıları enerji tüketimlerinin neden az olduğunu açıklamak için önemli bir nedendir. RECTANGLE bir bit dilim (Bit-slice) mimarisine sahiptir. Bu özellikler, yazılım uygulamalarında daha az güç tüketilmesine yardımcı olur. Arduino Mega 2560 için Piccolo ve PRESENT, ölçülen en yüksek güç tüketimi miktarına sahipler. Bahsedilen algoritmalar donanım platformlarında kullanılmak üzere tasarlanmıştır ve bu da yazılım uygulamalarında neden maksimum enerji tüketildiğini açıklamaktadır. Skipjack, RECTANGLE ve HIGHT, Arduino Mega 2560 için en az tüketen algoritmalardır. HIGHT, donanım platformları için tasarlanmış olmasına rağmen, şifreleme güç tüketimi açısından iyi bir performansı temsil etmektedir. Arduino Mega 2560, Raspberry Pi 3'e göre daha düşük işlemci ve hafıza özelliklerine sahiptir ve bu, Tablo 3.5'teki algoritmanın sırasını etkiler. Arduino Mega 2560 şeması için, PRESENT algoritması değerleri diğer blok şifrelerinden önemli ölçüde daha yüksek olduğundan, grafik ölçeğini 250'yi sınırlandırılmıştır. Bu durumda PRESENT algoritma enerji tüketimi, 512, 1024 ve 2048 bayt için eşit görülmektedir. Bir karşılaştırma olarak, bahsedilen faydalı yükler için PRESENT algoritmasının gerçek

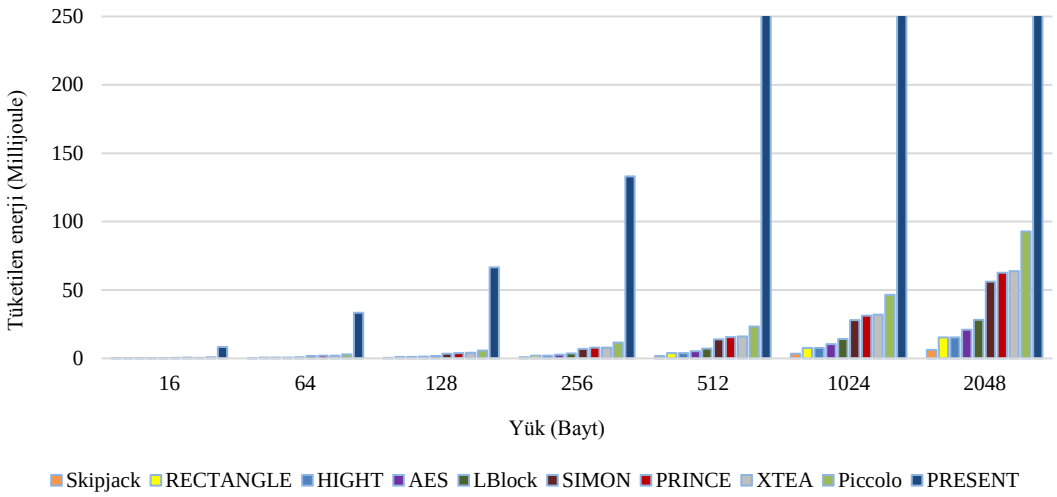
değerleri, aynı faydalı yükler için Piccolo algoritmasının enerji tüketiminden dokuz kat daha büyüktür.

**Tablo 3.4.** Raspberry Pi 3 ve Arduino Mega 2560'nın şifreleme işlemi için tüketilen enerji karşılaştırması.

| Cihaz | Yükler | Algoritmalar sırası (En düşükten en yükseğe) |
|---|---|---|
| Raspberry Pi 3 | 16 | XTEA, Skipjack, SIMON, RECTANGLE, AES, LBlock, HIGHT, PRINCE, Piccolo, PRESENT |
| | 64-128 | RECTANGLE, XTEA, Skipjack, SIMON, AES, LBlock, HIGHT, PRINCE, Piccolo, PRESENT |
| | 256-2048 | RECTANGLE, Skipjack, XTEA, SIMON, AES, LBlock, HIGHT, PRINCE, Piccolo, PRESENT |
| Arduino Mega 2560 | 16 | Skipjack, HIGHT, RECTANGLE, AES, LBlock, SIMON, XTEA, PRINCE, Piccolo, PRESENT |
| | 64-2048 | Skipjack, RECTANGLE, HIGHT, AES, LBlock, SIMON, PRINCE, XTEA, Piccolo, PRESENT |




**Şekil 3.16.** Şifreleme için tüketilen enerji (Raspberry Pi 3).

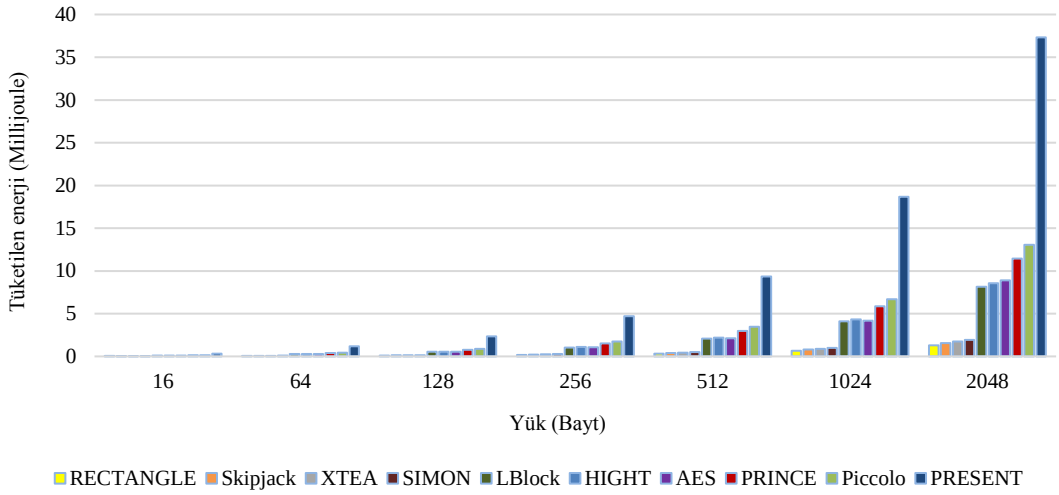



**Şekil 3.17.** Şifreleme için tüketilen enerji (Arduino Mega 2560).

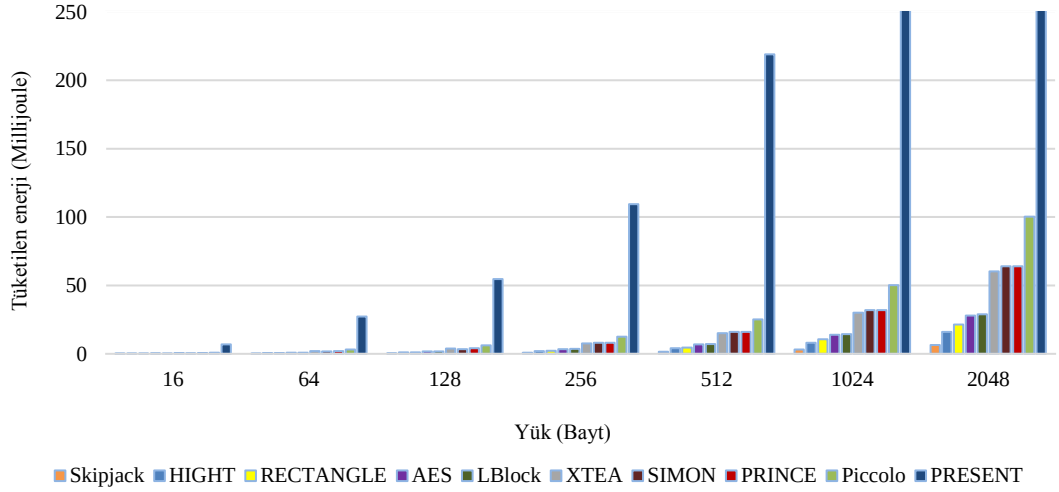
Şekil 3.18 ve Şekil 3.19, iki cihazın şifre çözme işlemi için ölçülen enerji tüketimini göstermekteler. Tablo 3.5, algoritmaların şifre çözme işlemini en düşükten en yükseğe doğru düzenlenmesinin daha iyi anlaşılmasına yardımcı olur. Şifre çözme modunda güç tüketimi, şifreleme işleminin istatistikleri benzer bir durum göstermektedir. Arduino Mega grafiği için dikey eksen, diğer algoritmaları daha iyi görselleştirmek için tıpkı şifreleme grafiği gibi 250 ile sınırlandırılmıştır.

**Tablo 3.5.** Raspberry Pi 3 ve Arduino Mega 2560'nın şifre çözme işlemi için tüketilen enerji karşılaştırması

| Cihaz | Yükler | Algoritmalar sırası (En düşükten en yükseğe) |
|---|---|---|
| Raspberry Pi 3 | 16 | XTEA, SIMON, Skipjack, RECTANGLE, LBlock, HIGHT, AES, PRINCE, Piccolo, PRESENT |
| | 64 | XTEA, Skipjack, RECTANGLE, SIMON, LBlock, HIGHT, AES, PRINCE, Piccolo, PRESENT |
| | 128-2048 | RECTANGLE, Skipjack, XTEA, SIMON, LBlock, HIGHT, AES, PRINCE, Piccolo, PRESENT |
| Arduino Mega 2560 | 16 | Skipjack, HIGHT, RECTANGLE, LBlock, AES, SIMON, XTEA, PRINCE, Piccolo, PRESENT |
| | 64-128 | Skipjack, HIGHT, RECTANGLE, AES, LBlock, SIMON, XTEA, PRINCE, Piccolo, PRESENT |
| | 256-2048 | Skipjack, HIGHT, RECTANGLE, AES, LBlock, XTEA, SIMON, PRINCE, Piccolo, PRESENT |




**Şekil 3.18.** Şifre çözme işleminde tüketilen enerji (Raspberry Pi 3).



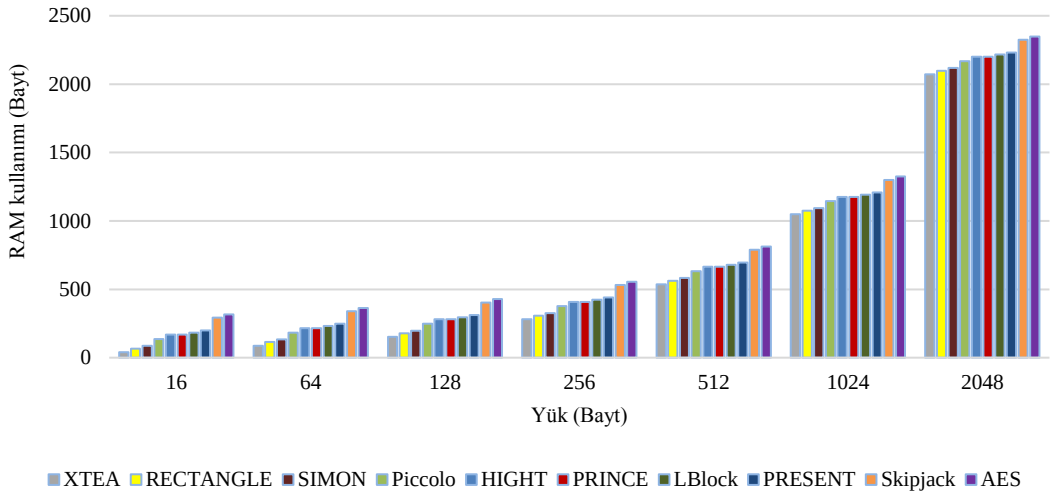

**Şekil 3.19.** Şifre çözme işleminde tüketilen enerji (Arduino Mega 2560).

Her blok şifre tarafından kullanılan bellek (RAM & ROM) miktarını analiz etmek için Microchip Studio 7 [110] kullanıldı. Şekil 3.20 ve Şekil 3.21, test edilen sistemler için şifreleme RAM kullanımını göstermektedir. Arduino Mega 2560, Raspberry Pi 3'ün 1 GB RAM ile kıyasla oldukça düşük SRAM boyutuna (8 KB) sahiptir. Tablo 3.6, iki cihaz arasındaki tüm faydalı yükler için şifreleme RAM kullanımını özetlemektedir. Raspberry Pi 3 için XTEA ve RECTANGLE, Arduino Mega 2560 için XTEA ve Piccolo'ya karşı minimum RAM kullanımına sahiptir. En yüksek RAM işgali göz önüne alındığında, Raspberry Pi 3 için Skipjack ve AES maksimum RAM kullanımına sahiptir. Arduino Mega için, HIGHT ve PRESENT maksimum değerlere ulaşmaktadır. Test edilen cihazların farklı donanım özellikleri ve test edilen

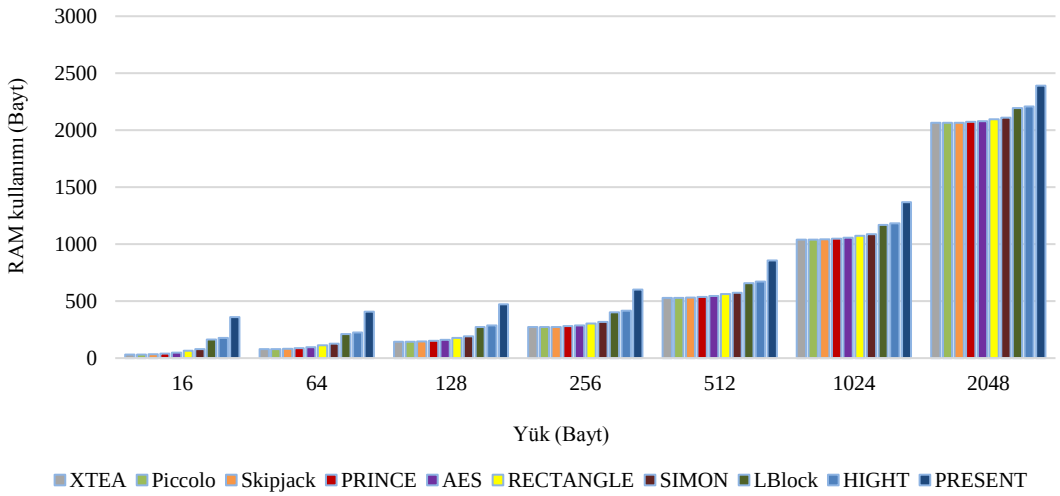
algoritmaların altyapısı ve tasarladıkları hedefler (Donanım veya yazılım sistemler), şifreleme ve şifre çözme modları için test sonuçlarını etkiler.

**Tablo 3.6.** Şifreleme RAM kullanımı için sıralanmış algoritmalar (Arduino Mega 2560, Raspberry Pi 3'e karşı).

| Cihaz | Yükler | Algoritmalar sırası (En düşükten en yükseğe) |
|---|---|---|
| Raspberry Pi 3 | 16-2048 | XTEA, RECTANGLE, SIMON, Piccolo, HIGHT, PRINCE, LBlock, PRESENT, Skipjack, AES |
| Arduino Mega 2560 | 16-2048 | XTEA, Piccolo, Skipjack, PRINCE, AES, RECTANGLE, SIMON, LBlock, HIGHT, PRESENT |




**Şekil 3.20.** Şifreleme RAM kullanımı (Raspberry Pi 3).



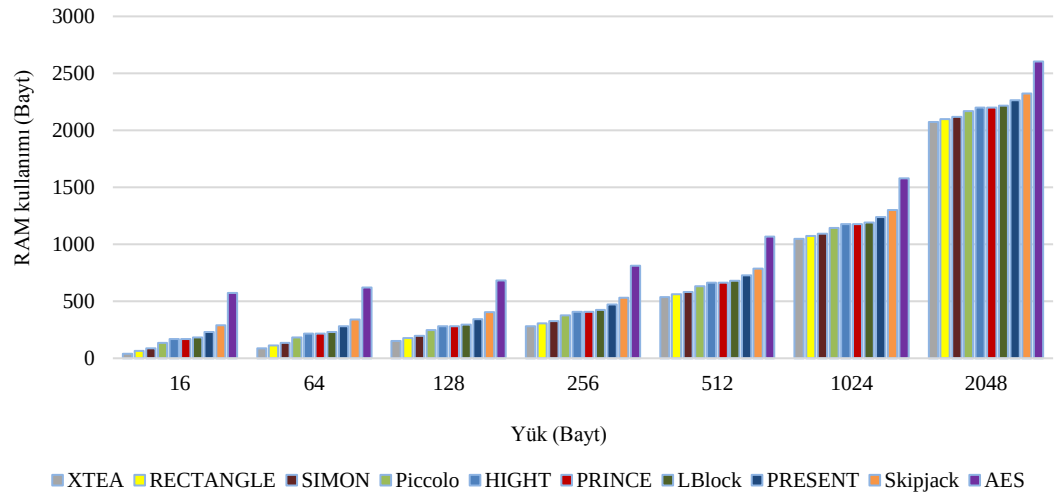

**Şekil 3.21.** Şifreleme RAM kullanımı (Arduino Mega 2560).

Şifre çözme RAM kullanımındaki değişiklikleri Şekil 3.22 ve Şekil 3.23'te gösterilmektedir. Tablo 3.7'de Raspberry Pi 3 için şifreleme moduna göre

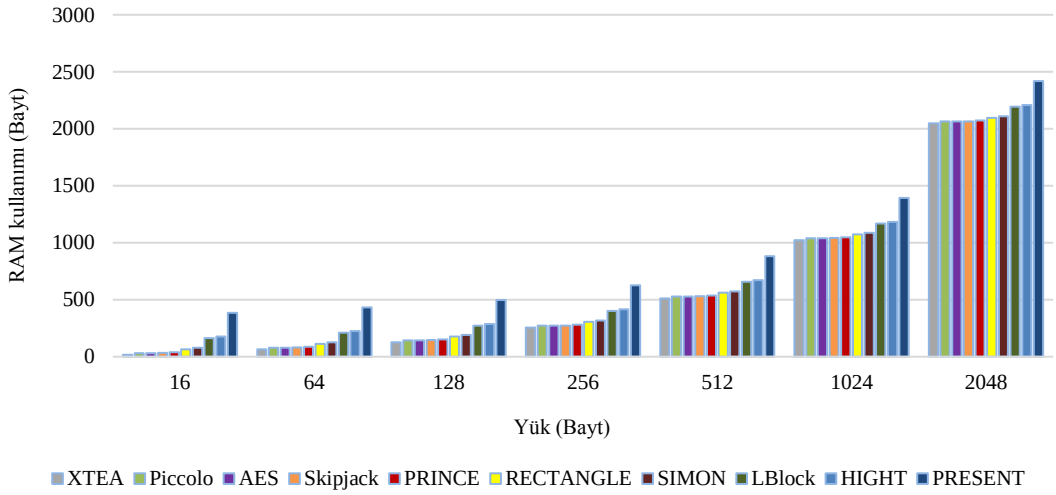
algoritmaların sıralamasında bir değişiklik bulunmamaktadır. Arduino Mega 2560 için XTEA, şifre çözme modu için minimum miktarda RAM kaplamıştır ve PRESENT, tıpkı şifreleme modu gibi maksimum değere ulaşır. Şifreleme işleminin aksine, Arduino Mega için algoritma sıralamasında bazı değişiklikler var.

**Tablo 3.7.** Şifre çözme RAM kullanımı için sıralanmış algoritmalar (Arduino Mega 2560, Raspberry Pi 3'e karşı).

| Cihaz | Yükler | Algoritmalar sırası (En düşükten en yükseğe) |
|---|---|---|
| Raspberry Pi 3 | 16-2048 | XTEA, RECTANGLE, SIMON, Piccolo, HIGHT, PRINCE, LBlock, PRESENT, Skipjack, AES |
| Arduino Mega 2560 | 16-2048 | XTEA, Piccolo, AES, Skipjack, PRINCE, RECTANGLE, SIMON, LBlock, HIGHT, PRESENT |




**Şekil 3.22.** Şifre çözme RAM kullanımı (Raspberry Pi 3).



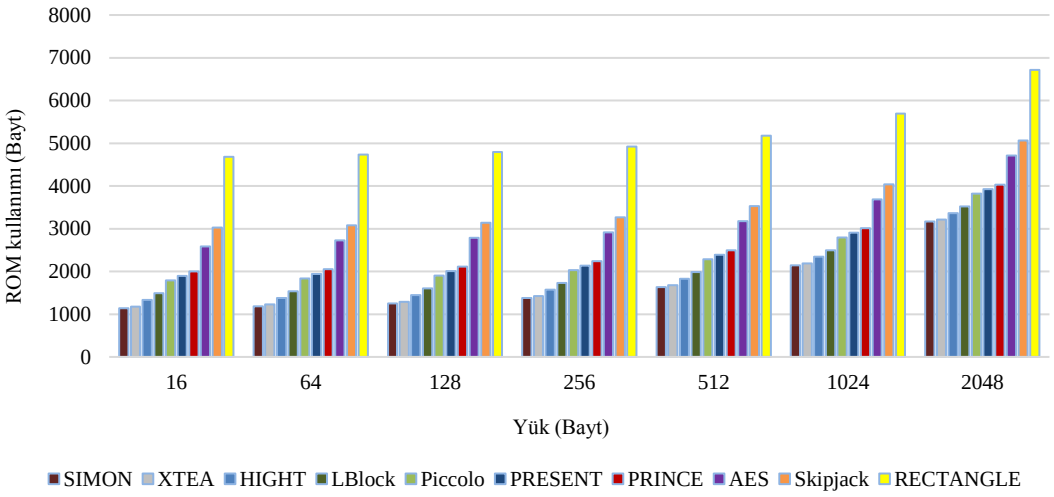

**Şekil 3.23.** Şifre çözme RAM kullanımı (Arduino Mega 2560).

Raspberry Pi 3'ün donanım özellikleri göz önüne alındığında Arduino Mega 2560'dan oldukça güçlüdür. Şekil 3.24 ve Şekil 3.25, iki cihaz arasında on hafif siklet şifreleme

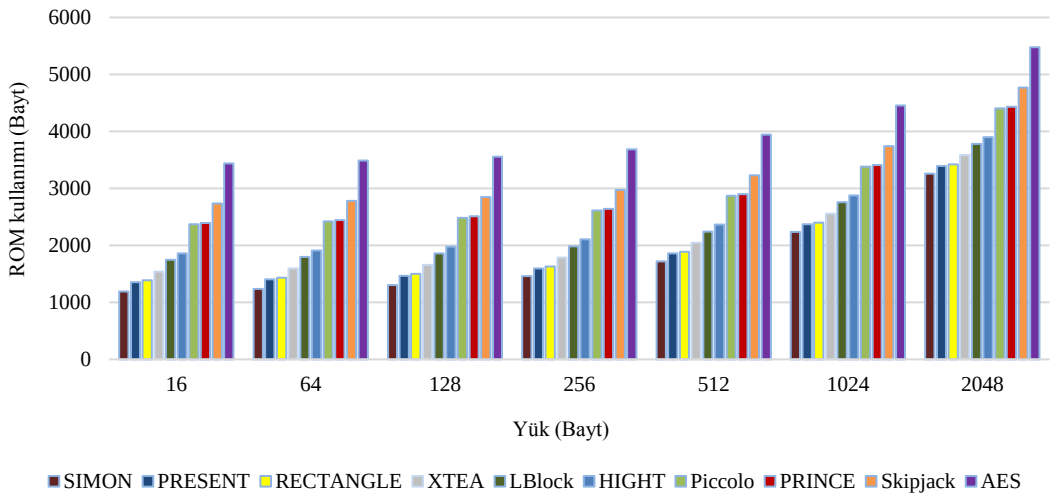
algoritması için iyi bir karşılaştırma sunmaktadır. Tablo 3.8, algoritmaların ROM kullanımını en düşükten en yükseğe doğru özetlemektedir. Şifreleme işlemi için bayt cinsinden en yüksek ROM kullanımı, Raspberry Pi 3 için RECTANGLE algoritmasına aittir ve Arduino Mega 2560 için AES en yüksek ROM'u işgal etmiştir. Raspberry Pi 3 için SIMON ve XTEA ve Arduino Mega için SIMON ve PRESENT en düşük ROM kullanımına sahipler.

**Tablo 3.8.** Şifreleme için ROM kullanım karşılaştırılması.

| Cihaz | Yükler | Algoritmalar sırası (En düşükten en yükseğe) |
|---|---|---|
| Raspberry Pi 3 | 16-2048 | SIMON, XTEA, HIGHT, LBlock, Piccolo, PRESENT, PRINCE, AES, Skipjack, RECTANGLE |
| Arduino Mega 2560 | 16-2048 | SIMON, PRESENT, RECTANGLE, XTEA, LBlock, HIGHT, Piccolo, PRINCE, Skipjack, AES |




**Şekil 3.24.** Şifreleme ROM kullanımı (Raspberry Pi 3).

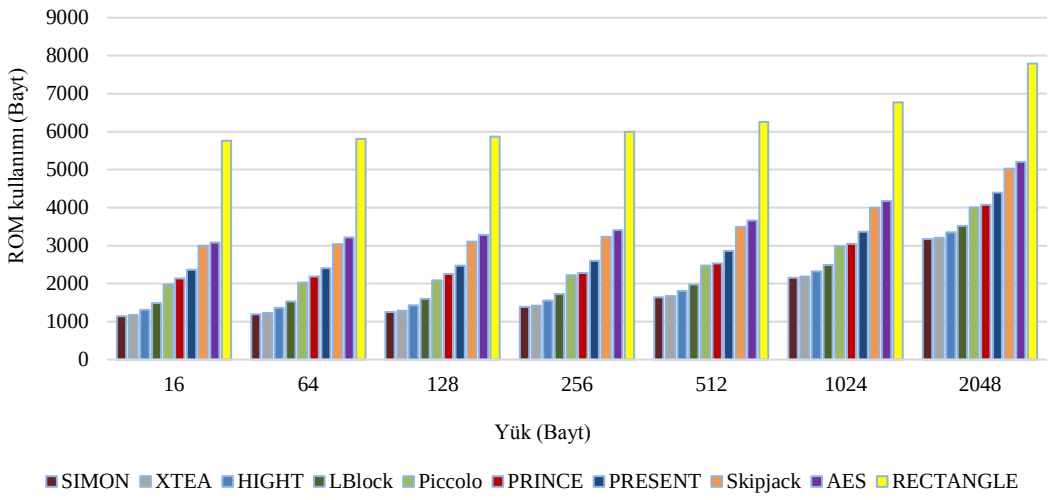



**Şekil 3.25.** Şifreleme ROM kullanımı (Arduino Mega 2560).

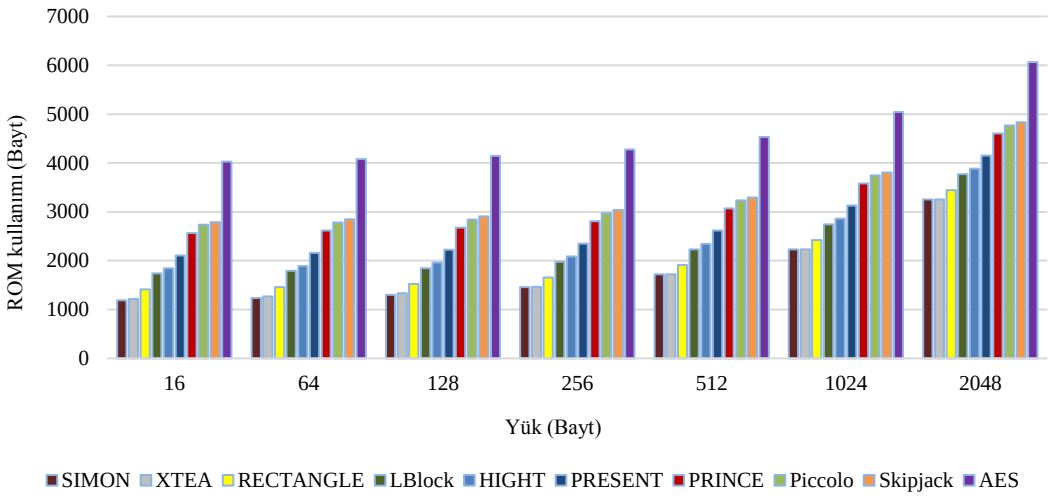
Şekil 3.26 ve Şekil 3.27, Raspberry Pi ve Arduino Meganın şifre çözme işlemi için farklı yüklere ilişkin on blok şifrenin ROM kullanımını göstermektedir. Şekil 3.26, RECTANGLE ve Şekil 3.27'de AES, başlangıçtan itibaren diğer blok şifrelere kıyasla önemli ölçüde daha yüksek miktarda ROM kullanımına sahiptirler. İlginç bir şekilde, ROM kullanımındaki artış oranı her iki cihaz için de belirli bir model izlemektedir. SIMON ve XTEA, şifre çözme modunda her iki cihaz için dahil, minimum ROM kullanımına sahiptir.

**Tablo 3.9.** Şifre çözme modunda ROM kullanım karşılaştırılması.

| Cihaz | Yükler | Algoritmalar sırası (En düşükten en yükseğe) |
|---|---|---|
| Raspberry Pi 3 | 16-2048 | SIMON, XTEA, HIGHT, LBlock, Piccolo, PRINCE, PRESENT, Skipjack, AES, RECTANGLE |
| Arduino Mega 2560 | 16-2048 | SIMON, XTEA, RECTANGLE, LBlock, HIGHT, PRESENT, PRINCE, Piccolo, Skipjack, AES |




**Şekil 3.26.** Şifre çözme ROM kullanımı (Raspberry Pi 3).

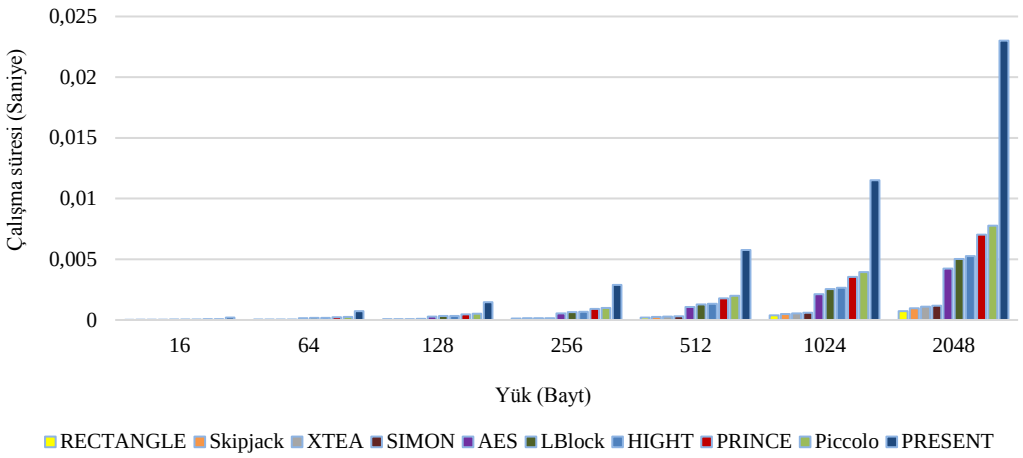



**Şekil 3.27.** Şifre çözme ROM kullanımı (Arduino Mega 2560).

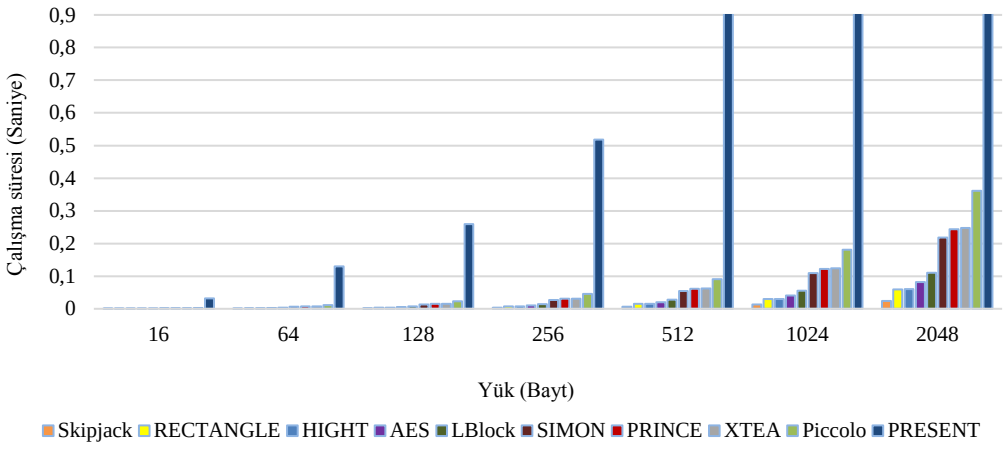
Raspberry Pi 3 ve Arduino Mega 2560 için ortalama şifreleme çalışma sürelerini Şekil 3.28 ve Şekil 3.29'de gösterilmiştir. Tüm faydalı yükler için PRESENT, her iki cihaz için de en yüksek şifreleme çalışma süresi ile ilk sıradadır. 512 bayttan sonra PRESENT çalışma süreleri yüksek olduğundan, Şekil 3.29'daki dikey eksen, diğer algoritmaların çalışma sürelerini net bir şekilde göstermek için 0,9 saniye ile sınırlandırılmıştır. Tablo 3.10'de her cihaz için ortalama şifreleme yürütme süresine göre artan on algoritma sıralanmıştır.

**Tablo 3.10.** Şifreleme çalışma süresine göre algoritmalar sıralaması.

| Cihaz | Yükler | Algoritmalar sırası (En düşükten en yükseğe) |
|---|---|---|
| Raspberry Pi 3 | 16 | XTEA, Skipjack, SIMON, RECTANGLE, LBlock, HIGHT, AES, PRINCE, Piccolo, PRESENT |
| | 64-128 | RECTANGLE, XTEA, Skipjack, SIMON, AES, LBlock, HIGHT, PRINCE, Piccolo, PRESENT |
| | 256-2048 | RECTANGLE, Skipjack, XTEA, SIMON, AES, LBlock, HIGHT, PRINCE, Piccolo, PRESENT |
| Arduino Mega 2560 | 16 | Skipjack, HIGHT, RECTANGLE, AES, LBlock, SIMON, XTEA, PRINCE, Piccolo, PRESENT |
| | 64-2048 | Skipjack, RECTANGLE, HIGHT, AES, LBlock, SIMON, PRINCE, XTEA, Piccolo, PRESENT |




**Şekil 3.28.** Ortalama şifreleme çalışma süresi (Raspberry Pi 3).

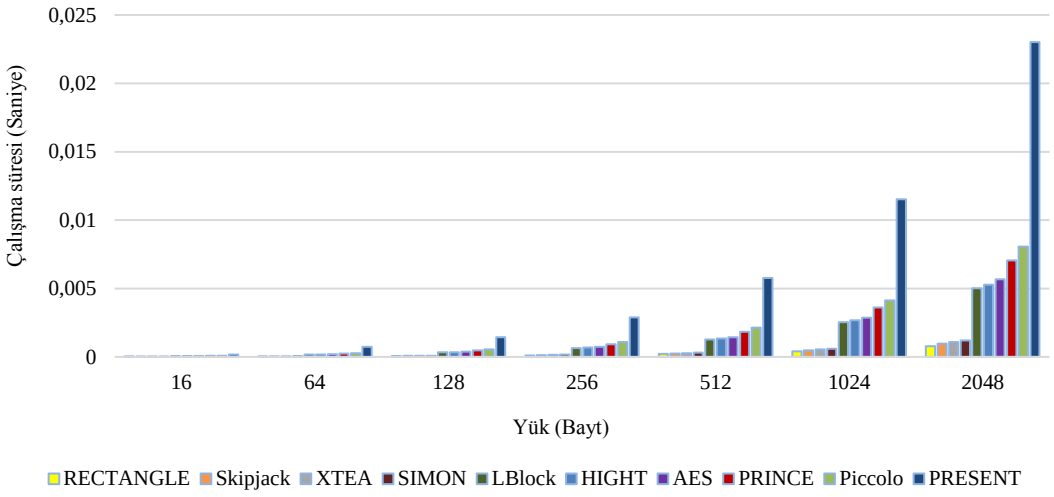



**Şekil 3.29.** Ortalama şifreleme çalışma süresi (Arduino Mega 2560).

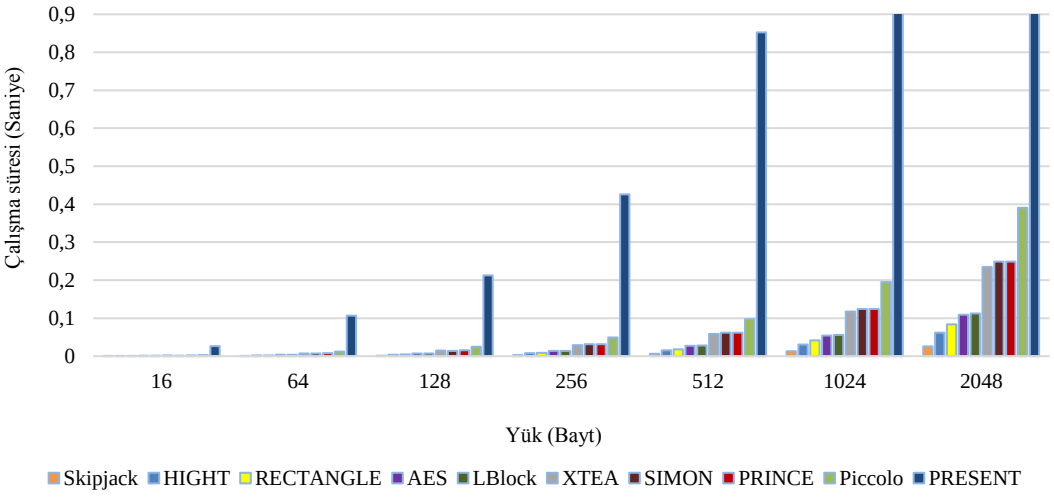
Şekil 3.30 ve Şekil 3.31 test ortamında şifre çözme işlemi için harcanan ortalama süreyi temsil etmektedir. İki grafik için, özellikle 128 bayttan başlayan en yüksek çalışma süreleri değerlerine sahip PRESENT blok şifresi gözükmektedir. Diğer algoritmaların çalışma sürelerini daha kolay görebilmek için ikinci grafikte yürütme süresi 0,9 saniye ile sınırlandırılmıştır. Tablo 3.11'de çalışma süresi dikkate alınarak algoritmanın şifre çözme işlem sırasını özetlemektedir. PRINCE, Piccolo ve PRESENT, donanım odaklı mimariye sahiptir ve yazılım uygulamalar için sırasıyla en yüksek çalışma sürelerine sahiptir. Diğer yandan Skipjack ve HIGHT basit bir yapıya sahip ve Arduino Mega için diğer algoritmalar arasında minimum çalışma sürelerine sahipler. Raspberry Pi 3 için XTEA ve RECTANGLE diğer hafif siklet şifrelerden daha hızlı olduğu tespit edilmiştir.

**Tablo 3.11.** Şifre çözme çalışma süresine göre algoritmalar sıralaması.

| Cihaz | Yükler | Algoritmalar sırası (En düşükten en yükseğe) |
|---|---|---|
| Raspberry Pi 3 | 16 | XTEA, SIMON, Skipjack, RECTANGLE, LBlock, HIGHT, AES, PRINCE, Piccolo, PRESENT |
| | 64 | XTEA, RECTANGLE, Skipjack, SIMON, LBlock, HIGHT, AES, PRINCE, Piccolo, PRESENT |
| | 128-2048 | RECTANGLE, Skipjack, XTEA, SIMON, LBlock, HIGHT, AES, PRINCE, Piccolo, PRESENT |
| Arduino Mega 2560 | 16 | Skipjack, HIGHT, RECTANGLE, LBlock, AES, SIMON, XTEA, PRINCE, Piccolo, PRESENT |
| | 64-2048 | Skipjack, HIGHT, RECTANGLE, AES, LBlock, SIMON, XTEA, PRINCE, Piccolo, PRESENT |




**Şekil 3.30.** Ortalama şifre çözme çalışma zamanı (Raspberry Pi 3).




**Şekil 3.31.** Ortalama şifre çözme çalışma süresi (Arduino Mega 2560).

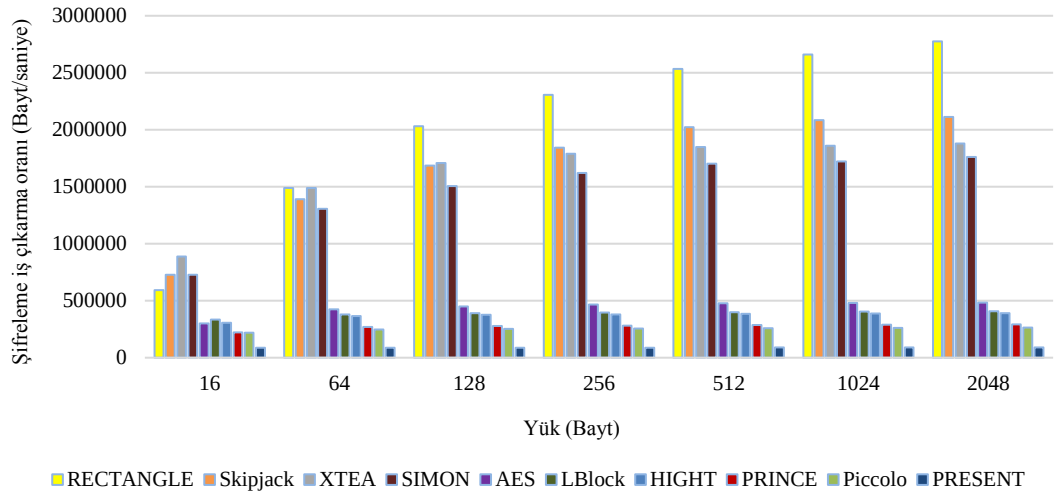
Raspberry Pi 3 ve Arduino Mega 2560 için ortalama şifreleme iş çıkarma oranı (Throughput) Şekil 3.32 ve Şekil 3.33'de gösterilmektedir. İş çıkarma oranı, aşağıdaki denklemi kullanılarak hesaplanmaktadır:

$$\text{İş çıkarma oranı} = \frac{Bayt\ Sayısı}{Bitiş\ zamanı - Başlangıç\ zamanı} \tag{3.3}$$

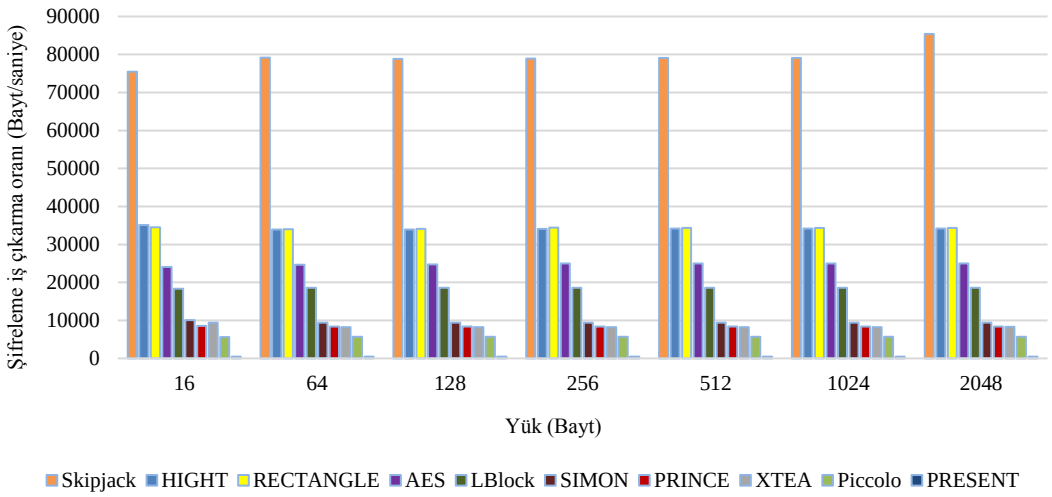
Şifreleme modunda, 16 bayt için, XTEA, Raspberry Pi 3'de diğer blok şifreler arasında en yüksek iş çıkarma oranı değeri elde etmektedir. 64 bayttan sonra, RECTANGLE, Raspberry Pi 3 için en yüksek iş çıkarma oranına sahiptir. Her iki cihaz için de PRESENT, en düşük şifreleme iş çıkarma oranı göstermektedir.

**Tablo 3.12.** Ortalama şifreleme iş çıkarma oranı sıralaması.

| Cihaz | Yükler | Algoritmalar sırası (En düşükten en yükseğe) |
|---|---|---|
| Raspberry Pi 3 | 16 | XTEA, SIMON, Skipjack, RECTANGLE, LBlock, HIGHT, AES, PRINCE, Piccolo, PRESENT |
| | 64-128 | RECTANGLE, XTEA, Skipjack, SIMON, AES, LBlock, HIGHT, PRINCE, Piccolo, PRESENT |
| | 256-2048 | RECTANGLE, Skipjack, XTEA, SIMON, AES, LBlock, HIGHT, PRINCE, Piccolo, PRESENT |
| Arduino Mega 2560 | 16-2048 | Skipjack, HIGHT, RECTANGLE, AES, LBlock, SIMON, XTEA, PRINCE, Piccolo, PRESENT |




**Şekil 3.32.** Ortalama şifreleme iş çıkarma oranı karşılaştırması (Raspberry Pi 3).

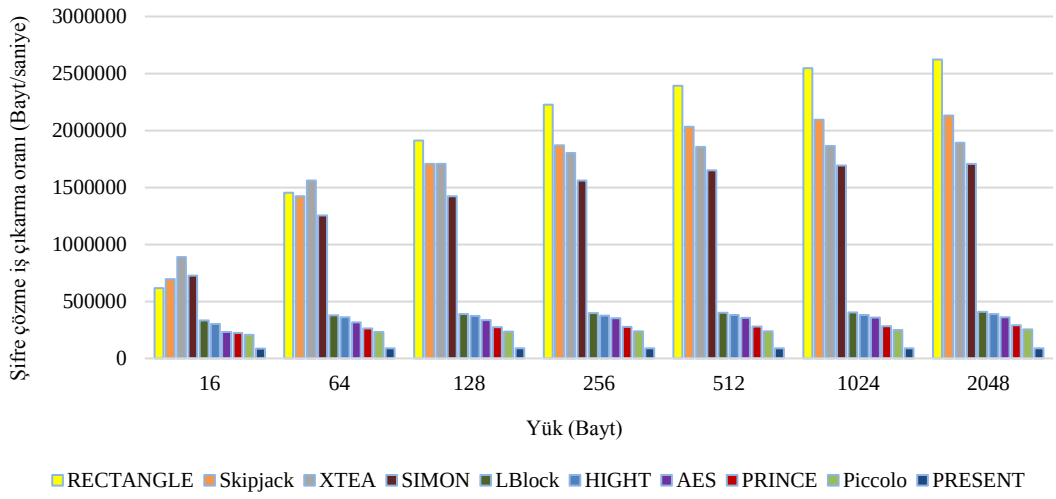



**Şekil 3.33.** Ortalama şifreleme iş çıkarma oranı karşılaştırması (Arduino Mega 2560).

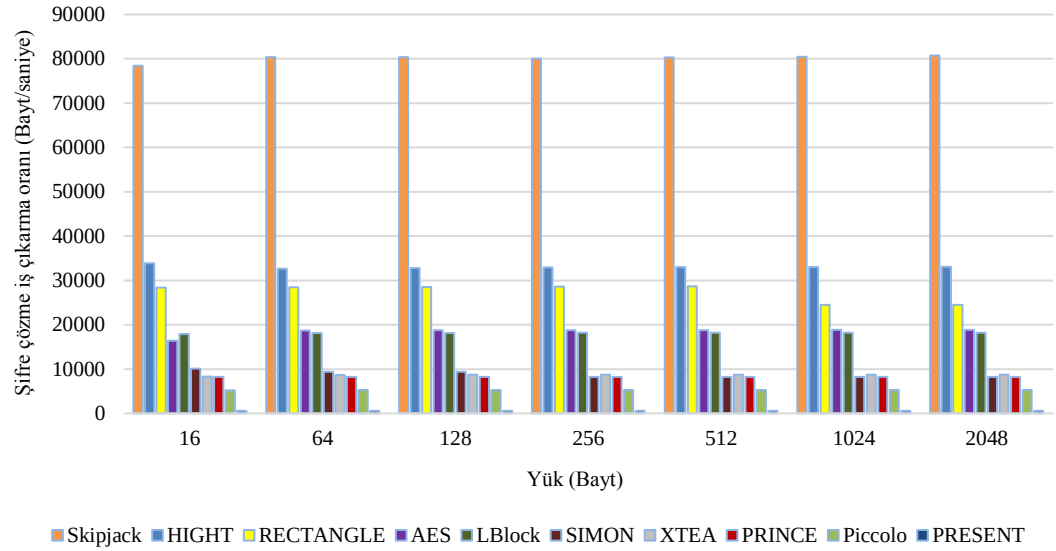
Şekil 3.34, Raspberry Pi 3 için ortalama şifre çözme iş çıkarma oranı değerlerini göstermektedir. RECTANGLE, Skipjack, SIMON ve XTEA, diğer algoritmalardan önemli ölçüde daha yüksek iş çıkarma oranlarına sahipler. PRINCE, Piccolo ve PRESENT şifreleme iş çıkarma oranı değerleri, diğerleri arasında en küçük olanlardır. Arduino Mega 2560 için (Şekil 3.35), Skipjack şifre çözme iş çıkarma oranı değeri diğer algoritmalardan önemli ölçüde daha büyüktür, HIGH ve RECTANGLE ikinci ve üçüncü konumlardalar. Beklendiği gibi, Piccolo ve PRESENT, her iki cihaz için minimum şifre çözme iş çıkarma oranı değerlerine sahiptir.

**Tablo 3.13.** Ortalama şifre çözmek iş çıkarma oranı sıralaması.

| Cihaz | Yükler | Algoritmalar sırası (En düşükten en yükseğe) |
|---|---|---|
| Raspberry Pi 3 | 16 | XTEA, SIMON, Skipjack, RECTANGLE, LBlock, HIGHT, AES, PRINCE, Piccolo, PRESENT |
| | 64 | RECTANGLE, XTEA, Skipjack, SIMON, AES, LBlock, HIGHT, PRINCE, Piccolo, PRESENT |
| | 128-2048 | RECTANGLE, Skipjack, XTEA, SIMON, AES, LBlock, HIGHT, PRINCE, Piccolo, PRESENT |
| Arduino Mega 2560 | 16 | Skipjack, HIGHT, RECTANGLE, LBlock, AES, SIMON, XTEA, PRINCE, Piccolo, PRESENT |
| | 64-128 | Skipjack, HIGHT, RECTANGLE, AES, LBlock, SIMON, XTEA, PRINCE, Piccolo, PRESENT |
| | 256-2048 | Skipjack, HIGHT, RECTANGLE, AES, LBlock, XTEA, PRINCE, SIMON, Piccolo, PRESENT |




**Şekil 3.34.** Ortalama şifre çözme iş çıkarma oranı karşılaştırması (Raspberry Pi 3).




**Şekil 3.35.** Ortalama şifre çözme iş çıkarma oranı karşılaştırması (Arduino Mega 2560).

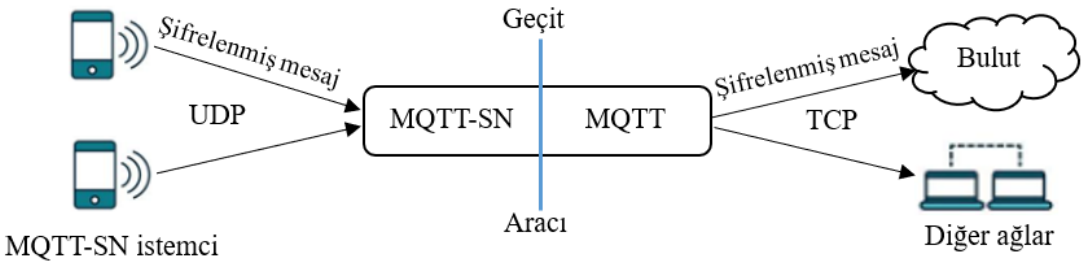
### 3.4. Bölüm Sonuçları

Bu bölümde literatürdeki hafif siklet kriptoloji algoritmaları incelenmiş ve kısıtlı kaynaklı IoT cihazlarında uçtan uca güvenlik sağlamak amacıyla kullanılacak seçilen şifreleme algoritmaları (AES, PRESENT, LBlock, Skipjack, SIMON, XTEA, PRINCE, Piccolo, HIGHT, RECTANGLE) blok uzunluğu, anahtar boyutları, popülaritesi, iç yapıları ve yazılım ortamları üzerinde uygulama olanakları kriterlere göre belirlenmiştir. Testler ve performans değerlendirmeleri Raspberry Pi 3 ve Arduino Mega 2560 üzerinde gerçekleştirilmiştir. Raspberry Pi 3 ve Arduino Mega

2560, diğer blok şifrelere kıyasla PRESENT algoritması için dikkat çekici şekilde maksimum enerji tüketir. Skipjack, RECTANGLE ve HIGHT, Arduino Mega 2560 için en az tüketen algoritmalardır. Raspberry Pi 3 için XTEA ve RECTANGLE, Arduino Mega 2560 için XTEA ve Piccolo'ya karşı minimum RAM kullanımına sahiptir. En yüksek RAM işgali göz önüne alındığında, Raspberry Pi 3 için Skipjack ve AES maksimum RAM kullanımına sahiptir. Arduino Mega için, HIGHT ve PRESENT maksimum değerlere ulaşmaktadır. Şifreleme işlemi için bayt cinsinden en yüksek ROM kullanımı, Raspberry Pi 3 için RECTANGLE algoritmasına aittir ve Arduino Mega 2560 için AES en yüksek ROM'u işgal etmiştir. Raspberry Pi 3 için SIMON ve XTEA ve Arduino Mega için SIMON ve PRESENT en düşük ROM kullanımına sahipler. Skipjack ve HIGHT basit yapılarıyla Arduino Mega için diğer algoritmalar arasında minimum çalışma sürelerine sahipler. Raspberry Pi 3 için XTEA ve RECTANGLE diğer hafif siklet şifrelerden daha hızlı oldukları tespit edilmiştir.

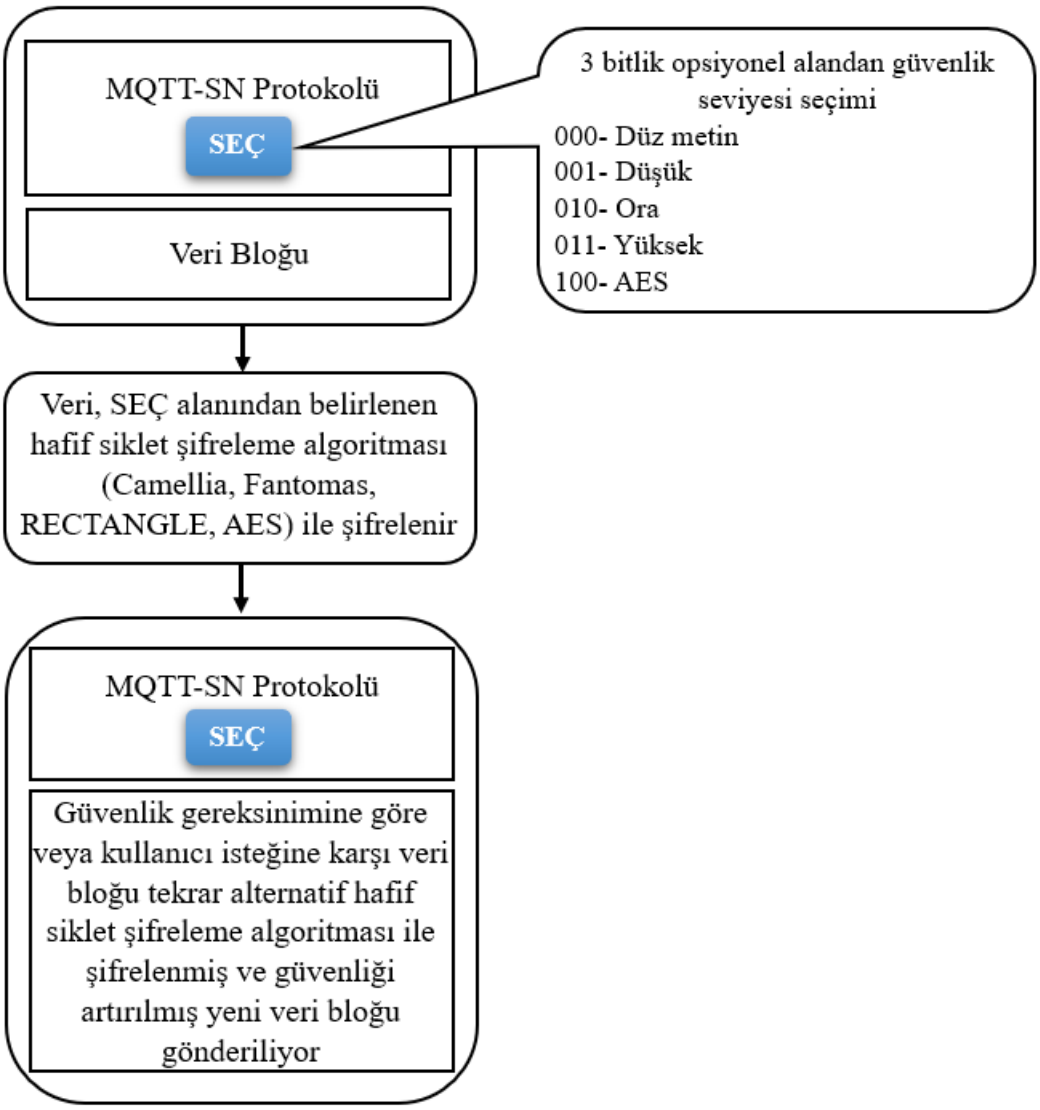
# 4. HAFİF SİKLET KRİPTOLOJİ ALGORİTMALARINA DAYALI IOT GÜVENLİ MESAJLAŞMA PROTOKOLÜ

MQTT-SN, özellikle IoT'nin bir alt kümesi olan kablosuz algılayıcı ağlarda çalışmak üzere tasarlanmıştır. Paketleri uçtan uca şifrelemek için güvenlik gereksinimlere göre dört hafif şifreleme algoritmadan biri seçilebilir. KAA'lara yönelik önerilen protokolün çalışacağı genel ağ mimarisi Şekil 4.1.'de verilmektedir.




**Şekil 4.1.** Önerilen protokolün iletişim mimarisi.

Şekil 4.2'de kullanıcı istekleri veya artırılmış BER gibi çeşitli uygulama güvenlik gereksinimlerine göre Zigbee ağları için dört aşamalı bir güvenlik düzeyi (FS-SSL) önerilmiştir. Kullanıcıya güvensiz veya güvenli modlar arasında seçim yapma yeteneği vermek için Zigbee MAC başlığında ayrılmış rezerve çerçeve kontrol alanı bitleri kullanılmıştır. Kullanıcı tarafından talep edildiğinde veya bit hata oranında bir artış olduğunda, fiziksel katmandan MAC katmanına geri bildirim göndermek için güvenli veri transferinde çapraz katmanlı mimari kullanılmıştır.




**Şekil 4.2.** Önerilen yaklaşımın işleyişi.

### 4.1. Kullanımı Önerilen Hafif Siklet Kriptoloji Algoritmaları

Bölüm 3'te sunulan Raspberry pi ve Arduino donanımları üzerinde hafif siklet kriptoloji algoritmalarının enerji tüketimi, şifreleme algoritmalarının mesaj gecikmelerine etkisi, bellek kullanımları gibi incelemeleri sonucu Camellia 128, RECTANGLE 128, Fantomas 64 ve AES 128 algoritmalarının güvenli ağ protokolünde kullanımı tercih edilmiştir. AES 128, Riverbed Modeler'da KAA için var olan tek şifreleme algoritmasıdır. Daha yüksek güvenlik, daha az karmaşıklık, daha az enerji tüketimi vb. gibi ayırıcı özelikler bir şifreleme algoritma seçiminde önde gelen kriterlerdir. Camellia, ISO/IEC organizasyonu tarafından onaylanmıştır ve AES ile karşılaştırılabilir işlem yeteneklerine ve güvenlik seviyelerine sahiptir. RECTANGLE

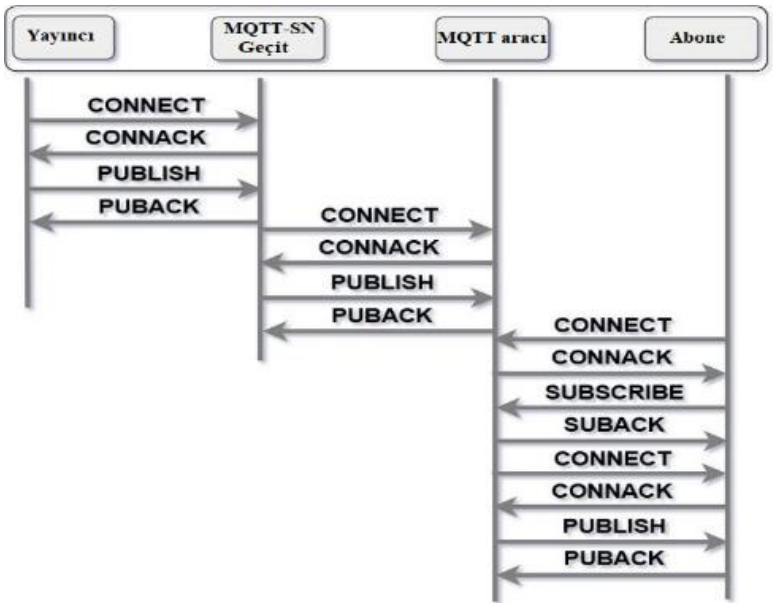
ve Fantomas, bitslice tekniğini kullanan yüksek hızlı yazılım uygulamasına sahiptir ve bu özellik onları çevrimiçi (Online) uygulamalar için iyi bir seçim haline getirmektedir. Adı geçen dört algoritma, enerji tüketimi, iş çıkarma oranı ve uçtan uca gecikme ölçümü kriterlerine göre karşılaştırılmıştır. Tablo 4.1 [13-14], seçilen algoritmaların kriptografik özelliklerini göstermektedir.

**Tablo 4.1.** Kullanılan hafif siklet şifreler karşılaştırması (Kriptografik özellikler).

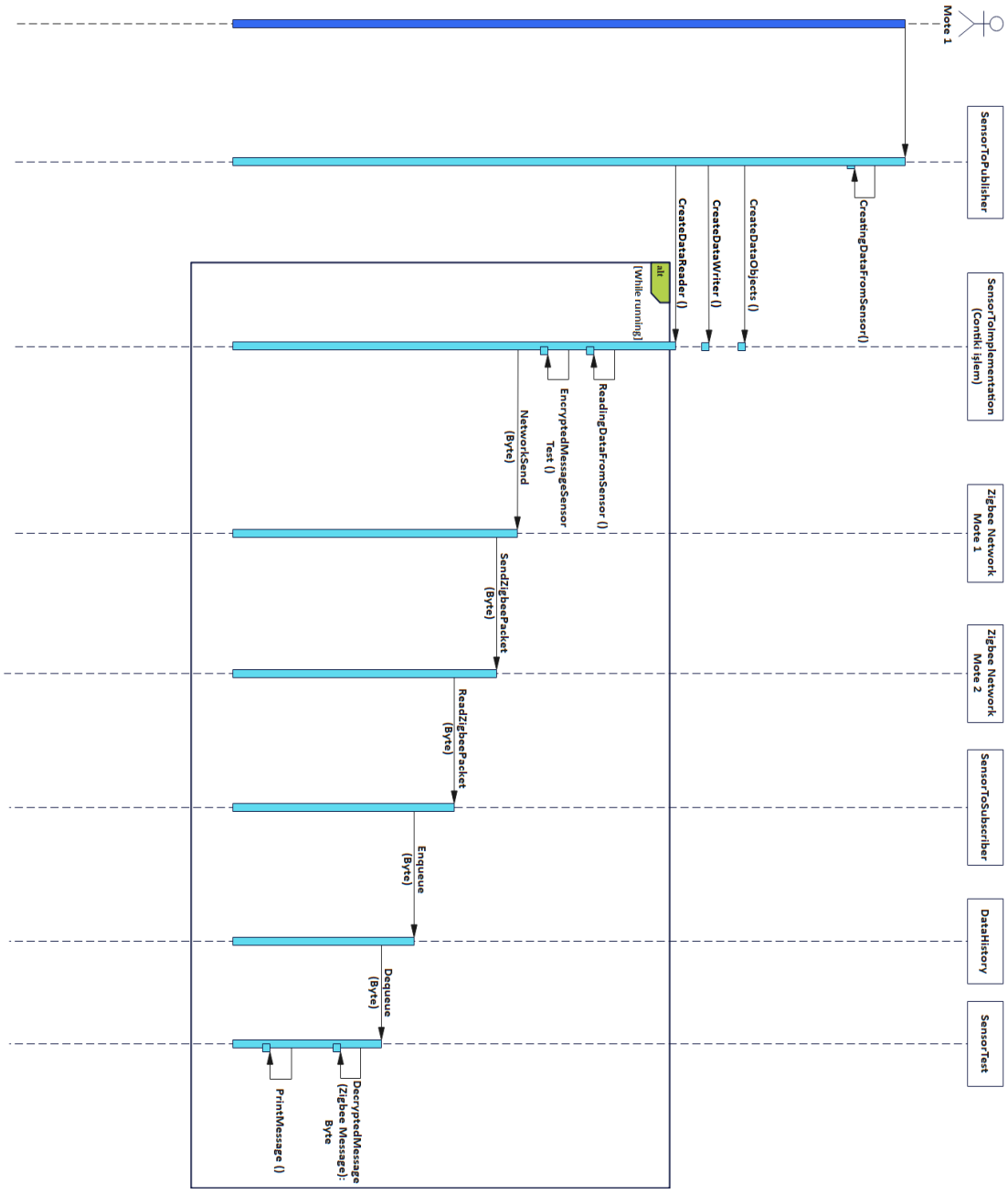
| Algoritma | Blok Uzunluğu | Anahtar Uzunluğu | Round Sayısı | Yapı | Saldırılar |
|---|---|---|---|---|---|
| AES | 128 | 128 | 10 | SPN | square<br>Partial sum<br>Impossible Diff<br>Boomerang |
| RECTANGLE | 64 | 128 | 25 | SPN | Differential |
| Fantomas | 128 | 128 | 12 | SPN | - |
| Camellia | 128 | 128 | 18 | Feistel | Square<br>Truncated Diff<br>Impossible Diff<br>Cache timing |

## 4.2. MQTT-SN

IoT'nin bir alt kümesi olan KAA'larda, MQTT-SN haberleşme protokolünde güvenli mesaj iletmek için uçtan uca şifreleme uygulanmıştır. Şifreleme işlemi Camellia 128, RECTANGLE 128, Fantomas 64 ve AES 128 algoritmaları uygulayarak gerçekleştirmiştir. MQTT-SN kontrol paketinde 3 rezerve biti kullanarak kullanıcı şifresiz (Düz metin) veya şifreli modlarında tanımlanan hafif siklet algoritmalardan birini seçebilir. Performans değerlendirmeleri, Zolertia Z1 ve Contiki (Cooja) simülatör üzerinden çoklu senaryolar için bellek, iş çıkarma oranı, pil tüketimi, uçtan uca gecikme ve ortalama çalıştırma zamanı kriterlerine göre karşılaştırılmıştır. MQTT-SN, taşıma protokolü olarak UDP kullanmaktadır. Tipik bir MQTT-SN mesaj alışveriş şeması Şekil 4.3'de gösterilmiştir. Örneğin, Bir MQTT-SN istemcisinden bir aracı veya ağ geçidine gönderilen ilk mesaj, bir CONNACK mesajı göndererek kabul edilir. Bir bağlantı kurulduktan sonra istemci abone olabilir ve mesajlar yayınlayabilir. Şekil 4.4 önerilen MQTT-SN güvenli mesaj gönderme sıralama diyagramı sunulmaktadır. Algılanan veri (Veya mesaj) SensorToImplementation işlem kısmında şifrelenir ve Zigbee ağına gönderilir. Alıcıda, paketin kodu sırasına göre çözülür ve düz metin elde edilir.



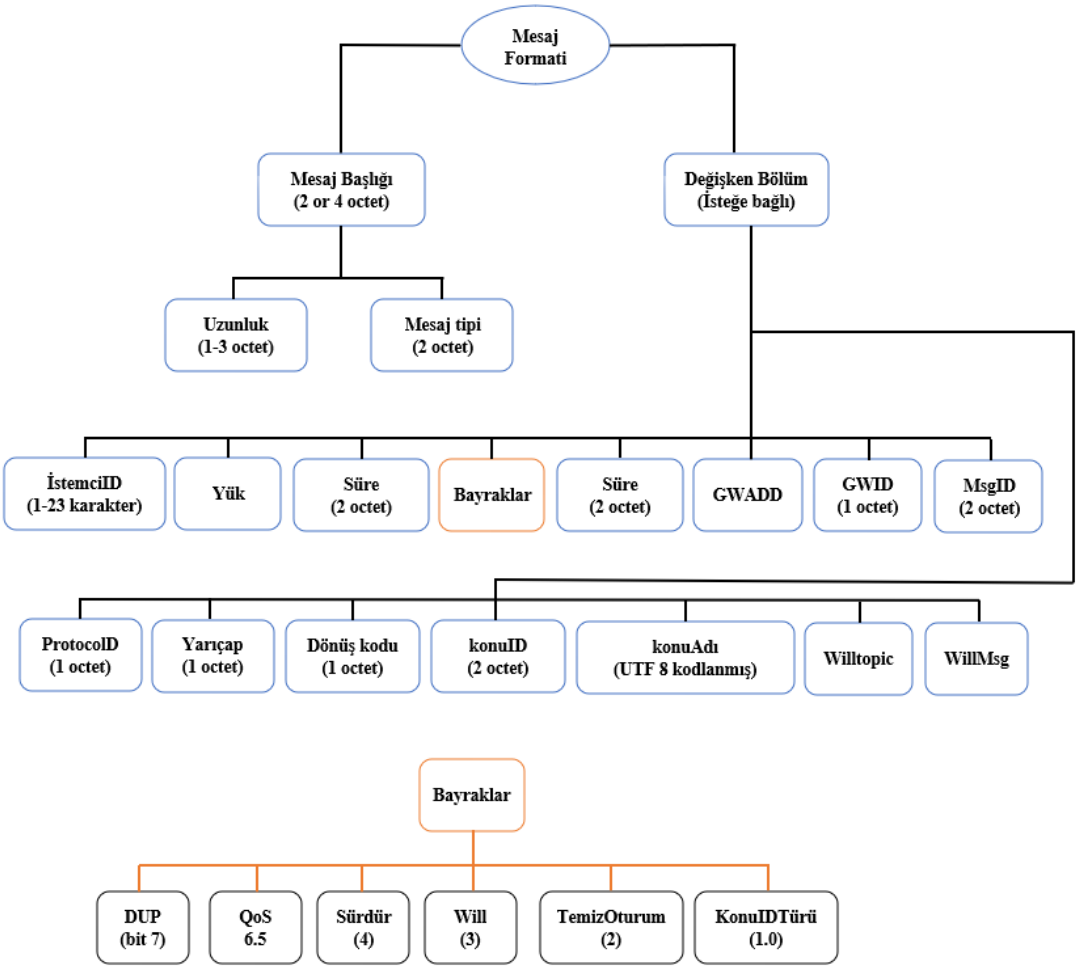

**Şekil 4.3.** MQTT-SN mesaj alışveriş şeması.




**Şekil 4.4.** Önerilen MQTT-SN güvenli mesaj gönderme sıralama diyagramı.

### 4.2.1. Mesaj Formatı

İstemci ve broker birbirleriyle iletişim kurarken, konu, yük vb. içinde nelerin yer alacağı gibi mesajdaki bazı kuralları takip ederler. Şekil 4.5, MQTT-SN mesaj formatını göstermektedir.




**Şekil 4.5.** MQTT-SN mesaj formatı.

#### 4.2.1.1. Sabit Başlık

MQTT-SN sabit başlığın ilk baytı, mesajın uzunluğudur. İkinci bayt mesaj türüdür. Uzunluk 0 bayttan itibaren dikkate alınacaktır.

#### 4.2.1.2. Değişken Başlık

DUP, Sürdür (Retain), WILL, TemizOturum (CleanSession) alanları MQTT ile aynıdır. İhtiyaca göre 0 veya bir olarak ayarlanırlar. Flag'in 0 ve 1'inci biti, konu kimliği türünü belirtmek için kullanılacaktır.

- Normal konu için 0, 1 bit 00 olacaktır.
- Önceden kimliği 0 tanımlanmış olan konu için 1 bit 01 olacaktır
- Küçük konu (Adı 0 olan) için 1 bit 10 olacaktır

5, 6. bit, hizmet kalitesini belirtmek için kullanılacaktır.

- QoS 0 - 5, 6 bit 00 olmalıdır
- QoS 1 - 5, 6 bit 01 olmalıdır
- QoS 2 - 5, 6 bit 10 olmalıdır

| KonuidTürü | TemizOturum | Will | Sürdür | QoS | DUP |
|---|---|---|---|---|---|
| 0, 1 | 2 | 3 | 4 | 5, 6 | 7 |

**Şekil 4.6.** MQTT-SN değişken paket formatı.

### 4.2.2. MQTT-SN Kontrol Paket Tipleri

MQTT-SN kontrol paket tipleri, Tablo 4.2'de gösterilen değerlerden biri olan 1 bayt uzunluğundadır.

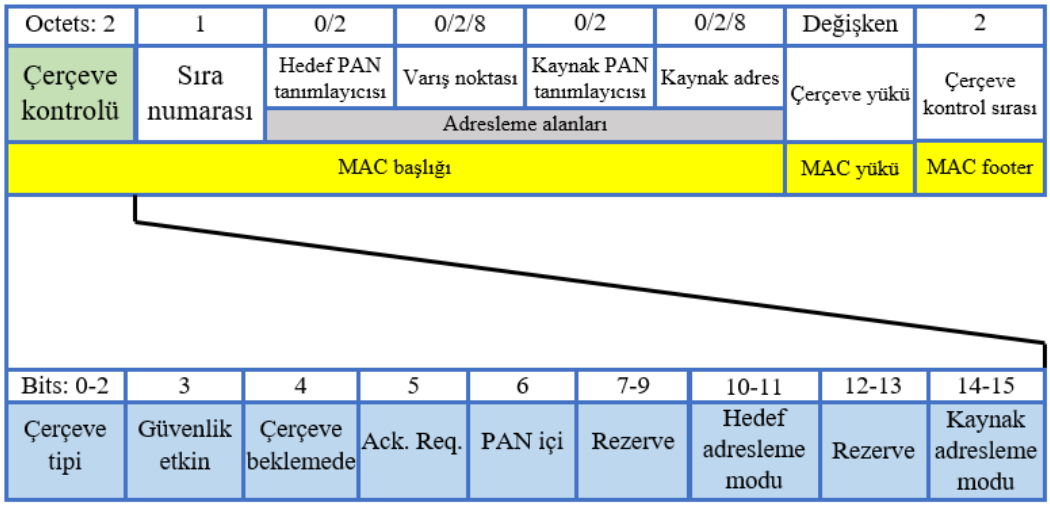
**Tablo 4.2.** MQTT-SN kontrol paket tipleri.

| Alan değeri | Mesaj | Alan değeri | Mesaj |
|---|---|---|---|
| 0x00 | ADVERTISE | 0x01 | SEARCHGW |
| 0x02 | GWINFO | 0x03 | reserved |
| 0x04 | CONNECT | 0x05 | CONNACK |
| 0x06 | WILLTOPICREQ | 0x07 | WILLTOPIC |
| 0x08 | WILLMSGREQ | 0x09 | WILLMSG |
| 0x0A | REGISTER | 0x0B | REGACK |
| 0x0C | PUBLISH | 0x0D | PUBACK |
| 0x0E | PUBCOMP | 0x0F | PUBREC |
| 0x10 | PUBREL | 0x11 | reserved |
| 0x12 | SUBSCRIBE | 0x13 | SUBACK |
| 0x14 | UNSUBSCRIBE | 0x15 | UNSUBACK |
| 0x16 | PINGREQ | 0x17 | PINGRESP |
| 0x18 | DISCONNECT | 0x19 | reserved |
| 0x1A | WILLTOPICUPD | 0x1B | WILLTOPICRESP |
| 0x1C | WILLMSGUPD | 0x1D | WILLMSGRESP |
| 0x1E-0xFD | reserved | 0xFE | Encapsulated message |
| 0xFF | reserved | | |

## 4.3. Önerilen Protokolün Benzetimi ve Performans Değerlendirmesi

Bu bölümde, Zigbee ağları için kullanıcı istekleri veya artan bit hata oranı gibi çeşitli uygulama güvenlik gereksinimlerine göre dört aşamalı bir güvenlik düzeyi (FS-SSL) önerilmiştir. MAC çerçeve kontrol alanının rezerve bitleri (9-12-13 bit) kullanarak, seçilen 4 algoritmanın (AES dahil) C kodu simülatöre eklenip, kullanıcıya beş moddan (Şifresiz veya diğer 4 algoritmadan arasından birini seçmek) birini seçmesine imkân

tanımlanmıştır. Kullanıcı seçimi durumunda beş mod seçilebilir (Tablo 4.3'de gösterilmiştir). Mod seçimleri iki şekilde yapılabilir: Kullanıcı tarafından Riverbed Modeler ağ simülatöründeki düğüm özellikler menüsü aracılığıyla (Gerekli C kodları simülatöre eklenmiştir) veya sistem tarafından dinamik olarak çapraz katmanlı mimari aracıyla bit hata oranın artışı durumunda uygulanacaktır. Şekil 4.7 Zigbee'nin genel MAC çerçeve formatı verilmektedir.




**Şekil 4.7.** Zigbee genel MAC çerçeve formatı.

**Tablo 4.3.** Kullanıcının MAC katmanında seçebileceği güvenlik seviyeleri.

| Mod | Açıklama |
|---|---|
| 0 | Düz metin göndermek |
| 1 | AES |
| 2 | RECTANGLE |
| 3 | Fantomas |
| 4 | Camellia |

Genellikle, uygulama katmanında verilerin şifrelenmesinden sonra, şifrelenen veriler ağ üzerinden gönderilmek üzere fiziksel katmana iletilir. Bu durumda, ağın BER [111] değerinin artması veya kullanıcı tarafından şifreleme algoritmasının değiştirilmesi talebi olması durumunda, şifrelenmiş veriyi uygulama katmanına tekrar şifrelemek için göndermek yerine, MAC katmanına yönlendirilir. BER'in azaltılması ağ ömrünü uzatır ve ayrıca düğüm enerji tüketimini azaltır [112]. Bir kullanıcının fiziksel katmanda başka bir şifreleme algoritması seçmesi için en olası senaryo ağ durumudur (Trafik yükü, güvenlik derecesi vb.). Zigbee MAC başlığındaki çerçeve kontrol alanının ayrılmış bitlerini kullanarak, kullanıcı veya sistem dinamik olarak (Fiziksel katmanda BER artış varsa, sistem daha düşük ağırlıklı bir algoritmaya tekrar şifreleyecektir), talep edilen güvenlik seviyesine göre hafif siklet şifreleme algoritmalarından birini seçebilir. Algoritmaların ağırlığı Tablo 4.4'de tanımlanmıştır.

MAC katmanındaki her bir algoritmanın ayrılmış bitler aracılığıyla ağırlığı, tez ‘de elde edilen simülasyon sonuçları, hesaplanan iş çıkarma oranı ve enerji tüketimi gibi metriklere dayalı olarak tanımlanmıştır. AES, seçilen algoritmalar arasında en yüksek güvenliğe sahiptir. Ancak daha fazla kaynak tüketmektedir. Güvenlik seviyesinin kullanıcı için daha az kritik olduğu zaman, ancak ağ ömrü ve pil kullanımı gibi sınırlı kaynakların verimli ve uzun ömürlü olması gerektiği durumlarda çözüm, hafif algoritmalardır. Tez çalışma kapsamında olan senaryoda kullanıcı, güvenlik gereksinimlerine göre uygulama katmanı üzerinden algoritmayı seçmektedir. Ağ aktifken, çapraz katman mekanizması tarafından kullanılan şifreleme algoritması, bit hata oranına (Fiziksel katmandan algılanan veriler) göre Tablo 4.4'de verilen algoritmalardan değiştirilebilir.

**Tablo 4.4.** Katmanlar arası güvenlik seviyesi seçmek.

| Ağırlık | Açıklama |
|---|---|
| 0 | Düz metin göndermek |
| 1 | Camellia |
| 2 | Fantomas |
| 3 | RECTANGLE |
| 4 | AES |

# 5. MQTT-SN TEMELLİ GÜVENLİ AĞ PROTOKOLÜNÜN BENZETİMİ

Tez çalışmasında önerilen MQTT-SN temelli güvenli ağ protokolünün benzetimi ve performans değerlendirmesi Riverbed Modeler ve Contiki (Cooja) simülatörleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Riverbed Modeler simülatöründe, Zigbee ağındaki MICAz algılayıcılar üzerinde farklı performans değerleri (Dört hafif şifreleme algoritmaların C kodu MAC katmanına ilave edilmiştir) incelenmiştir. Bu simülatör, Windows ortamında çalıştırılmıştır.

Linux ortamında Contiki (Cooja) simülatörde seçilen dört hafif siklet algoritmanın C kodu Zolertia Z1 algılayıcılar içine gömülmüş ve performansı çeşitli kriterler açısından karşılaştırılmıştır. Bu bölümde, bir önceki bölümde algılayıcı ağlar için önerilen güvenlik çözümlerin uygulamaları ve simülasyonları sunulmaktadır.

## 5.1. Riverbed Modeler Uygulaması

Önerilen yaklaşımın performans değerlendirmeleri iki ayrı ortamda gerçekleştirilmiştir: MICAz algılayıcı üzerinde ve Riverbed Modeler 18.5.1 ağ simülatörü. Şifreleme ve şifre çözme çalıştırma süresi, enerji tüketimi ve iş çıkarma oranı gibi değerler Şekil 5.1'de görüldüğü gibi MICAz algılayıcı kullanarak hesaplanmıştır. Bellek kullanımını (RAM ve ROM) şifreleme ve şifre çözme modlarında hesaplamak için Microchip Studio'da dört algoritmanın C kodu Atmel ATmega 128L'e (MICAz mikro denetleyicisi) gömüldükten sonra bellek kullanım değerleri ölçülmüştür. Mesajları ve anahtar değişkenlerini tanımı ATmega 128L mikro denetleyicinin RAM'inde gerçekleştirilmiştir. Böylece, her blok şifrenin C kodu 8 bitlik ATmega 128L platformda en az RAM miktarını kullanacaktır. Her senaryo en az beş kere tekrarlanmıştır. Atmel ATmega 128L mikro denetleyici 128Kbyte flash belleğe, 4Kbyte EEPROM, 4Kbyte SRAM ve 16MHz'e kadar hıza sahip, düşük güç tüketimli bir denetleyicidir. Donanımsal özellikleri nedeniyle IoT çözümleri için tercih edilmektedir.

İkinci aşamada, ağ tarafı ölçümleri için, seçilen algoritmaların performansı Zigbee (802.15.4 standardı) ağ üzerinden iş çıkarma oranı, uçtan uca gecikme ve enerji

tüketimi açısından Windows 10 Pro'da, Riverbed Modeler 18.5.1 üzerinde gerçekleştirilmiştir. Senaryolar, farklı mesaj boyutları ve düğüm sayılarına göre tanımlanmıştır. Riverbed Modeler' de, kablosuz algılayıcı ağların enerji tüketimini ölçecek bir araç bulunmamaktadır. Bunun için Riverbed Modeler simülatöründe Open-ZB simülasyon modeli kullanılmıştır. Hafif siklet şifrelerin tüm kaynak kodları C dilinde optimize edilerek Open-ZB MAC katman düğüm modeline entegre edilmiştir.

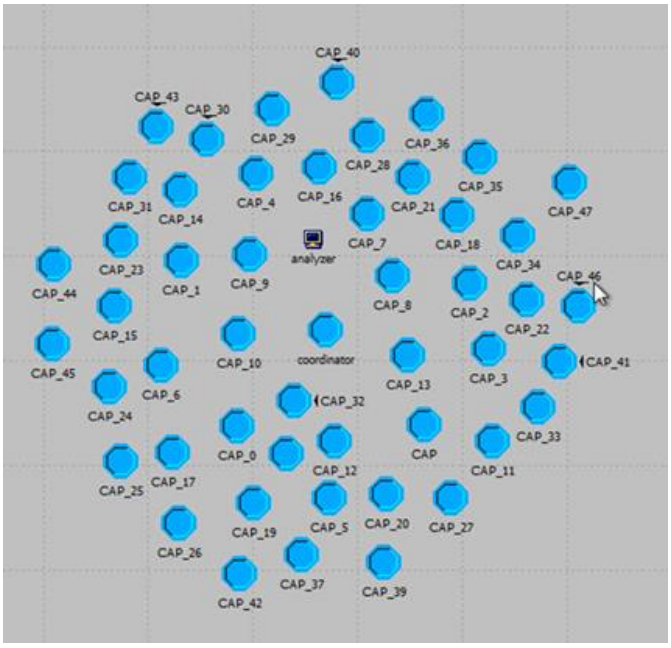
Bölüm 4'de belirtildiği gibi, kullanıcıya "Şifrelenmemiş" modu veya dört algoritmadan birini seçme yeteneği vermek için çerçeve kontrol alanından (MAC katmanı üzerinden) beş rezerve bit kullanılmıştır. Tablo 5.1, Riverbed Modeler'daki simülasyon parametrelerini göstermektedir. Düğümler 100*100 metrekare bir alanda rastgele dağılmıştır. Senaryolar, farklı mesaj boyutlarına 5, 10, 25 ve 50 düğüm üzerinde en az 5 defa çalıştırılmıştır.

**Tablo 5.1.** Ağ simülasyon parametreleri.

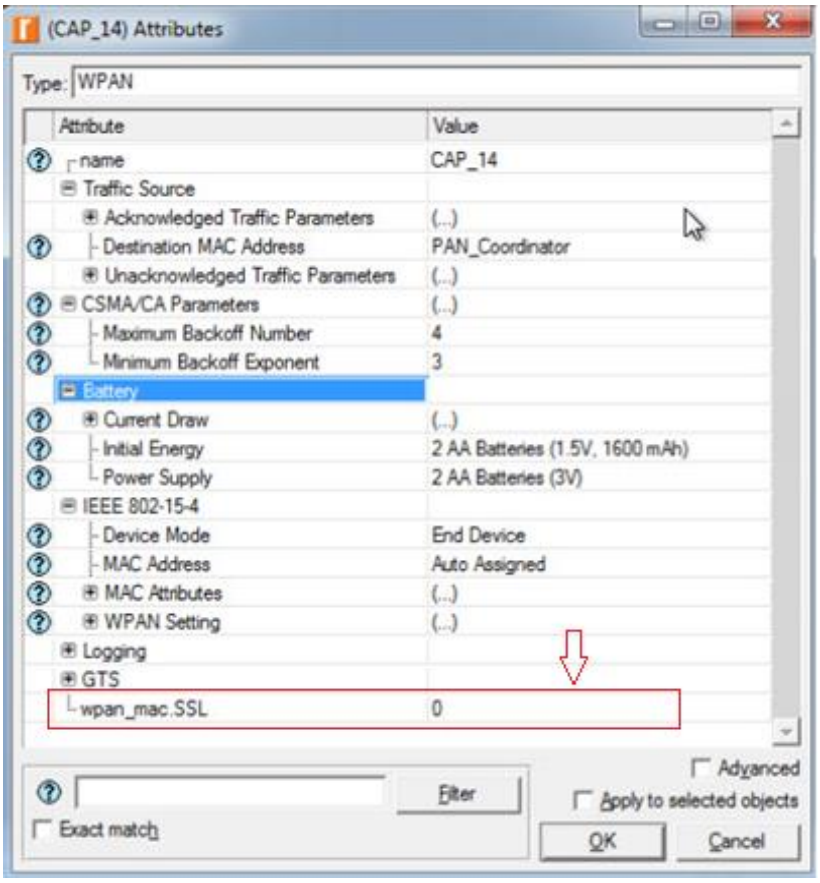
| Parametre | Değer |
|---|---|
| Düğüm sayısı | 3, 5, 10, 25, 50 |
| Algılayıcı tipi | MICAz |
| Algılayıcı iletim aralığı | 100 feet |
| Veri hızı | 256 kbit/s |
| Mesaj boyutu | 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024 Bayt |
| Düğümlerin frekansı | 2.4 GHz |
| Başlangıç enerjisi | 2 AA (1.5 V, 1600mAh) |
| Alan boyutu | 100*100 m |
| Simülasyon süresi | 30 dakika |
| Seed | 128 |
| Yol kayıp modeli | Free Space |

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2 sırasıyla MICAz algılayıcı ve örnek Riverbed Modeler'de 50 düğümlük ağ yapısı simülasyonu sunmaktadır. Şekil 5.3, Riverbed Modeler simülatöründeki düğüm özelikleri (Attribute) menüsünün örnek bir görünümünü göstermektedir. Aşağıda gösterildiği gibi, kullanıcının tanımlı modlardan birini seçmesini sağlayan düğüm özellikleri menüsüne bir "wpan_mac.SSL" alanı eklenmiştir. Şekil 5.4 Open-ZB düğüm modelini göstermektedir.

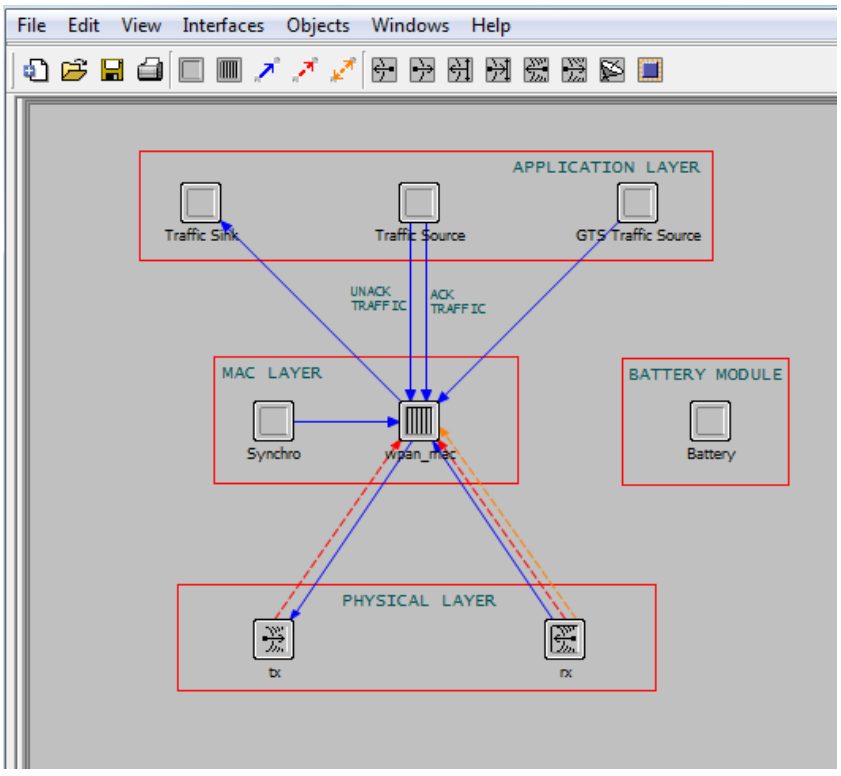
**Şekil 5.1.** MICAz algılayıcı.




**Şekil 5.2.** Riverbed Modeler' de örnek 50 düğümlük ağ yapısı.

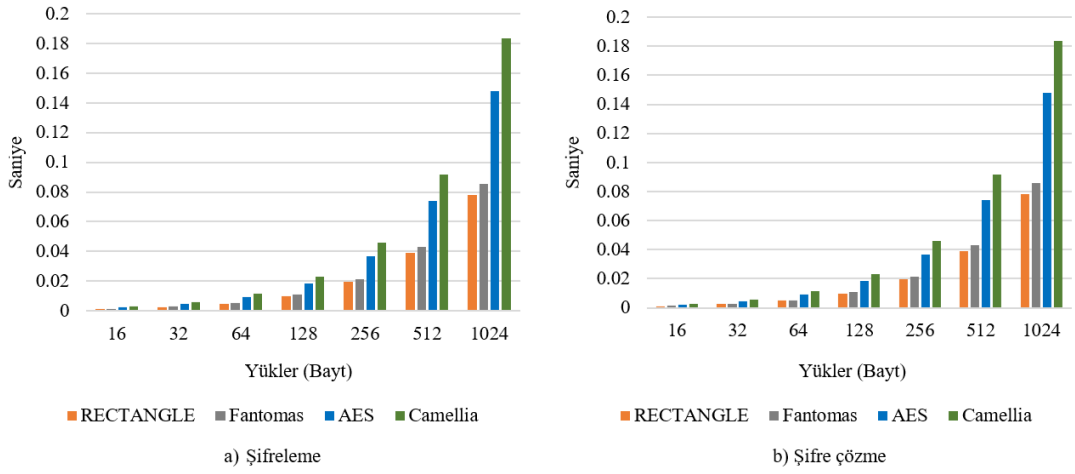



**Şekil 5.3.** Riverbed Modeler' da bir düğüm için örnek özelik menüsü.




**Şekil 5.4.** Open-ZB düğüm modeli.

Şekil 5.5 (a) ve Şekil 5.5 (b), sırasıyla Atmel ATmega 128L üzerinden şifreleme ve şifre çözme işlemleri için dört algoritma arasındaki ortalama çalıştırma sürelerini karşılaştırır. Çalıştırma sürelerini ölçmek için, şifreleme ve şifre çözme anahtar zamanlaması, şifreleme ve şifre çözme fonksiyonları temel kriter olarak ele alınmış ve her senaryo MICAz (Atmel ATmega 128L) algılayıcı ve Microchip Studio üzerinden beş iterasyon için tekrarlanmıştır. İki grafik dahil, RECTANGLE, tüm mesaj boyutları için minimum ve Camellia maksimum çalışma sürelerine sahipler. RECTANGLE, bit dilimleme tekniğini kullanır (Bu teknik yazılım uygulamaları için çok verimlidir), bu nedenle daha yüksek bir yazılım çalıştırma hızına sahiptir. Fantomas'ın S-Box algoritması aynı şekilde bit-dilimleme şeklinde uygulanmıştır. Şifreleme ve şifre çözme işlemleri için RECTANGLE ve Fantomas çalışma sürelerinin tüm mesaj boyutlarında yakın olduğu gözükmektedir. Fantomasın dahili LS tasarımı [8], RECTANGLE ile karşılaştırıldığında, çalışma süreleri açısından ikinci sıraya yerleştirdi. AES, Camellia'nın aksine şifreleme ve şifre çözme modları için yaklaşık bir buçuk kat daha hızlı çalışma sürelerine sahiptir çünkü Camellia şifresi, her altı turdan sonra mantıksal fonksiyonlar ve anahtar beyazlatma işlemleri için ek bir tur kullanır.




**Şekil 5.5.** Ortalama çalıştırma süreleri.

ATmega 128L platformu ve ağ uygulamaları için Şekil 5.6'da farklı mesaj boyutları için şifreleme ve şifre çözme iş çıkarma oranı karşılaştırması sunulmaktadır. Grafikler, tüm yükler için en küçüğünden maksimum veriye kadar olan değerleri temsil etmektedir. İş çıkarma oranını hesaplamak için aşağıdaki denklemler kullanılmıştır:

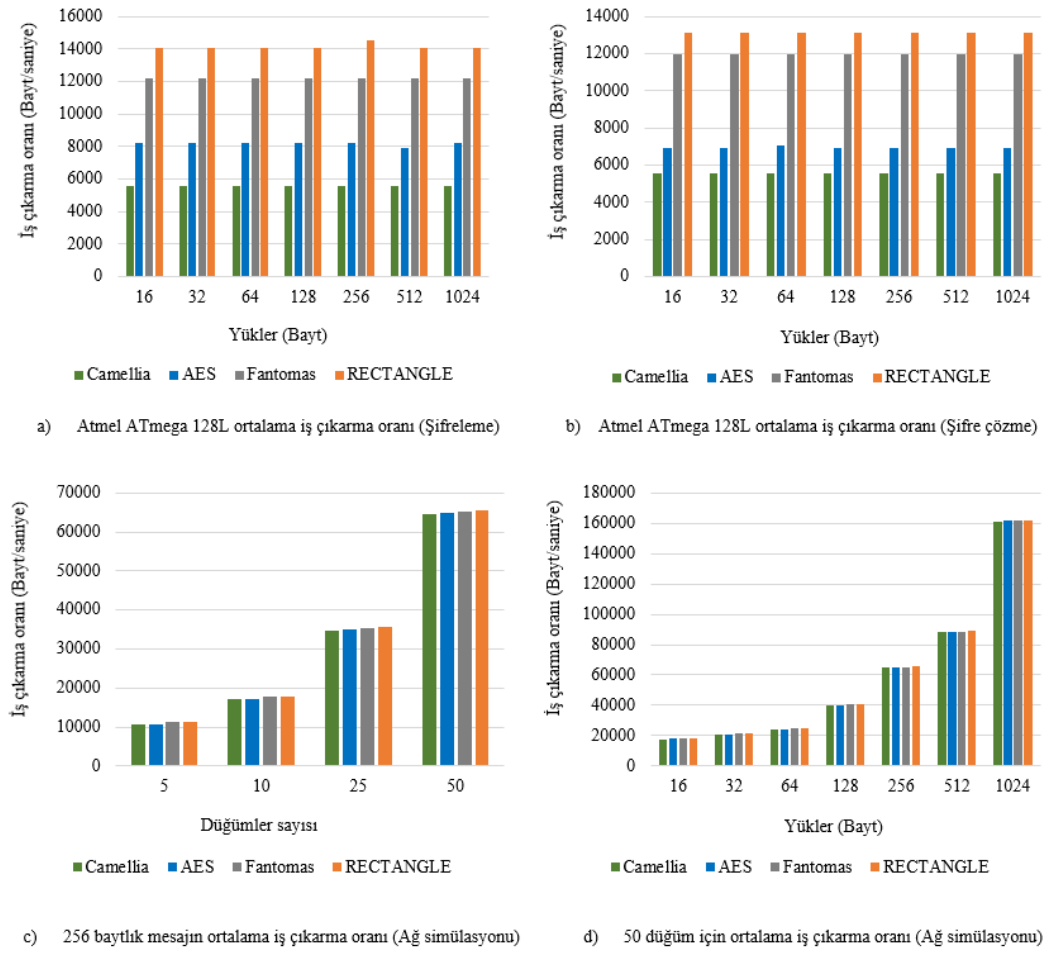
$$Şifreleme\ iş\ çıkarma\ oranı\ (MICAz)\ =\ \frac{N_B}{T_e} \qquad (5.1)$$

$$Şifre\ çözme\ iş\ çıkarma\ oranı\ (MICAz)\ =\ \frac{N_B}{T_d} \tag{5.2}$$

$$İş\ çıkarma\ oranı\ (Ağ) = \frac{N_D * P}{T} \tag{5.3}$$

Denklem 5.1 ve 5.2'de $N_B$, blok boyutu sayısıdır, $T_e$ ve $T_d$ sırasıyla şifreleme ve şifre çözme fonksiyonlar için çalıştırma süresini temsil etmektedir. Denklem 5.3'de (Riverbed Modeler), $N_D$ teslim edilen paketlerin sayısıdır, P paket boyutu anlamına gelir ve T ise toplam simülasyon süresidir.

Hafif siklet şifreleri değerlendirmek için iş çıkarma oranı ve enerji tüketimi iki ana kriterdir. Şekil 5.6 (a) ve Şekil 5.6 (b), ATmega 128L (MICAZ algılayıcı) üzerindeki tüm yükler için en küçükten maksimum veriye kadar ortalama değerleri temsil eder. Bu kısmın çıktısını hesaplamak için (5.1) denklemi kullanılmıştır. Camellia algoritması, her iki grafikteki tüm mesaj boyutları için en düşük iş çıkarma oranına sahiptir. Camellia'dan sonra AES ve Fantomas, RECTANGLE (Tüm yükler için en hızlı çalışma süresine sahiptir) algoritmasını takip etmektedir.




a) Atmel ATmega 128L ortalama iş çıkarma oranı (Şifreleme)

b) Atmel ATmega 128L ortalama iş çıkarma oranı (Şifre çözme)

c) 256 baytlık mesajın ortalama iş çıkarma oranı (Ağ simülasyonu)

d) 50 düğüm için ortalama iş çıkarma oranı (Ağ simülasyonu)

**Şekil 5.6.** Farklı senaryolar arasında iş çıkarma oranı karşılaştırması.

Şekil 5.6 (c) ve Şekil 5.6 (d), 256 bayt şifreli veri aktarımını ve 50 düğüm üzerindeki aktarım hızını göstermektedir. Senaryoları iki modda gerçekleşmiştir: Güvensiz (Düz metin gönderme) ve güvenli iletim (Şifreli metin gönderme). Modelleyici bir metin dosyasından düz metin okur ve şifreli metin oluşturur.

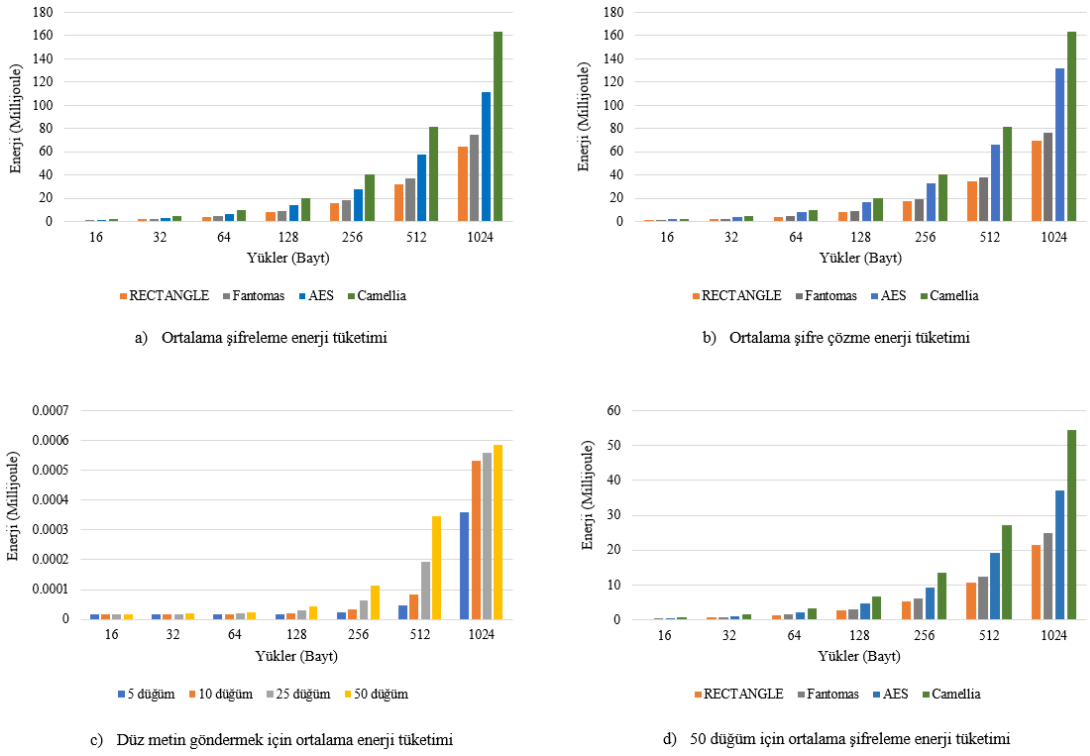
Her senaryo beş iterasyon için çalıştırılmış ve birden çok düğüm için ortalama iş çıkarma oranı hesaplanmıştır. Her iki grafik için beklendiği gibi, RECTANGLE diğer algoritmalar arasında en yüksek iş çıkarma oranına ve Camellia minimum değere sahiptir. 256 baytlık bir mesaj için, düğüm sayısındaki artış, özellikle Şekil 5.6 (c) beş düğümden sonra, iş çıkarma oranı değerini iki katına çıkarır. Camellia, tüm yükler için en düşük iş çıkarma oranı değerine sahiptir. Diğer yandan en yüksek ortalama iş çıkarma oranı RECTANGLE algoritmasına aittir. Sırasıyla tüm faydalı mesaj boyutları için en küçükten, Camellia, AES, Fantomas ve RECTANGLE olarak düzenlenebilir. En yüksek iş çıkarma oranı, daha verimli ağ anlamına gelir.

Ortalama enerji tüketimi Şekil 5.7'de görünmektedir. MICAz (İki AA pil ile çalışır) algılayıcı üzerinden enerji tüketimini hesaplamak için voltaj ve amper değerleri bir multimetre kullanarak ölçülmüştür. MICAz algılayıcı için tüketilen enerji aşağıdaki denklemler ile hesaplanmıştır.

$$I * t = Q \tag{5.4}$$

$$Q * V = E \tag{5.5}$$

Denklem 5.4'te, "I" mevcut akımdır, "t" zamanı ve "Q" yükü temsil eder. Denklem 5.5'te, "V" voltaj anlamına gelir ve "E", jul cinsinden enerji tüketimini gösterir. Daha önce de belirtildiği gibi, enerji tüketimi çalışma süresi ile yüksek oranda ilişkilidir.




**Şekil 5.7.** Ortalama enerji tüketimi karşılaştırması.

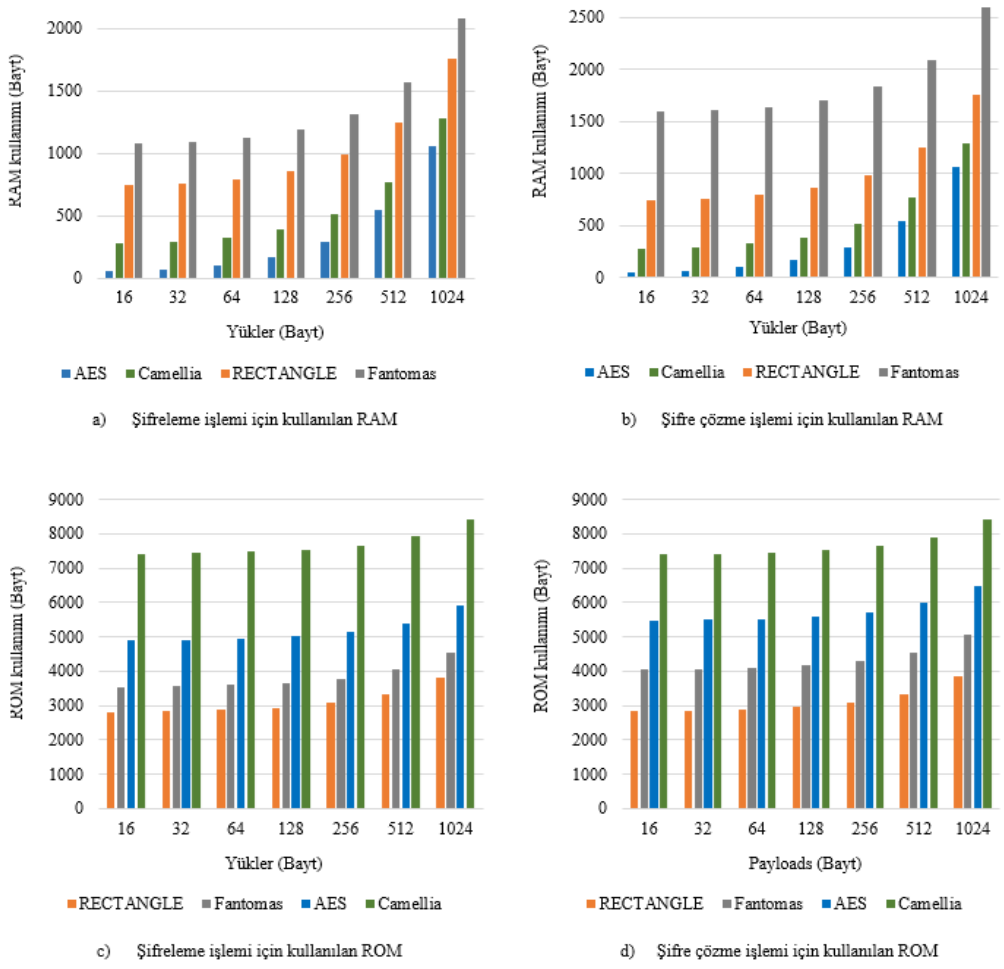
Ağ tarafında (Şekil 5.7 (c) ve Şekil 5.7 (d)), Open-ZB simülasyon modelinin pil modülü, düğümlerin tüketilen ve kalan enerji seviyelerini ölçebilir. Şekil 5.7 (a) ve 5.7 (b)'deki çubuk grafiklerin (MICAZ algılayıcı üzerinden) yüksekliklerindeki farklılıklara bakarak, RECTANGLE'ın tüm faydalı yükler için şifreleme ve şifre çözme işlemleri için diğer algoritmalara kıyasla en düşük miktarda enerji tüketimi izlenmektedir. Çalışma süresi grafikleriyle karşılaştırıldığında, beklendiği gibi Camellia, özellikle 512 bayttan sonra daha fazla enerji tüketir ve 1024 bayt'ta maksimum değere ulaşmaktadır. Şekil 5.7 (d), ağ üzerinden düz metin göndermek için ortalama enerji tüketimini temsil eder. 256 bayta kadar enerji tüketiminin tüm düğümler için biraz arttığı görülmektedir. 512 bayt için artış hızı daha da yükselir, ancak 1024 bayt için enerji tüketimi çarpıcı biçimde artar. 50 düğümden oluşan Zigbee ağının enerji tüketimini Şekil 5.7 (d)'de temsil edilmiştir. RECTANGLE algoritması diğer blok şifrelere kıyasla minimum enerji tüketir (Şekil 5.7 (d)). Tüm taşıma yükleri için Camellia maksimum enerji tüketimine sahiptir.

RAM ve ROM kullanım miktarı, Microchip Studio programında ölçülmüştür. RAM kullanım miktarı, başlatılmış veri (Veri segmenti) artı başlatılmamış verinin (BSS segmenti) toplamıdır. Blok şifrelerin RAM boyutu, Round anahtarın boyutundan dolayı değişmektedir. RAM kullanımını optimize etmek ve azaltmak için cihazın

(Atmel ATmega 128L) RAM bölmesinde, başlatma (Initialize) vektörü, Round anahtarı, anahtar ve düz metin tanımlanmıştır.

Şekil 5.8 (a) ve Şekil 5.8 (b), şifreleme ve şifre çözme işlemleri için RAM kullanımlarını göstermektedir. AES, şifreleme ve şifre çözme grafiklerinde en iyi RAM kullanımına sahiptir ve 11 Round anahtara sahiptir (Her biri 128 bit uzunluğunda). Kullanıcı tarafından temin edilen şifreleme anahtarı, AES algoritması için yuvarlak anahtarları sağlamaktadır. AES'den sonra Camellia ikinci sırada yer alıyor. Camellia-128 algoritmasında ana anahtar ve 26 adet yuvarlak anahtarı (Her biri 64-bit) mevcuttur. Round anahtarları, anahtar zamanlamasını kullanarak elde edilir. RECTANGLE üçüncü sırada yer alır ve 128 bit ana anahtara ve 64 bit round anahtara sahiptir. Fantomas, her iki grafik için diğer algoritmalar arasında en yüksek RAM kullanımına sahiptir. Fantomas bir başlatma vektörü ve ana anahtara sahiptir ve herhangi bir anahtar zamanlayıcısı tasarımında yer almıyor.

Şekil 5.8 (c) ve Şekil. 5.8 (d), Atmel ATmega 128L üzerinden seçilen algoritmaların ROM (Kod boyutu) kullanımlarını temsil etmektedir. Kod boyutu, sabitler (L, S, P-kutuları, round), yazılım kodu ve arama tablolarını depolamak için kullanılan alandır. Bir blok şifrenin kod boyutu, temel olarak sabitlerin boyutuna ve sayısına göre hesaplanır. Her iki çubuk grafik benzer bir algoritma sıralaması düzenine sahiptir. RECTANGLE en düşük ROM'u kullanır ve Camellia diğer blok şifreler arasında en yüksek ROM kullanımına sahiptir. RECTANGLE, tek bir küçük 4-bite 4-bit S-Box ve 5-bitlik round sabiti kullanır. Fantomas, RECTANGLE'den sonra ikinci sırada yer alıyor ve 8x8 S-Box ve 16*16 bit L-Box'a sahiptir. Fantomas, 3 adet yuvarlak 3/5 bit S-Box uygular ve işlemleri korumak için yuvarlak sabit uygulamaktadır. Fantomas'tan sonra AES üçüncü sırada yer alıyor. AES, tüm turlar (Tüm mesajlarda) için tek bir S-Box kullanır ve S-Box'ı 16'ya 16 eşleme Tablosu olarak görülebilir. 2round_number modulo Galois Alan 28, AES'in round sabitlerinin değerleridir. Camellia, tüm mesaj uzunluklarında maksimum ROM kullanımına sahiptir. Camellia, dört adet 8*8 bit S-Box kullanır.

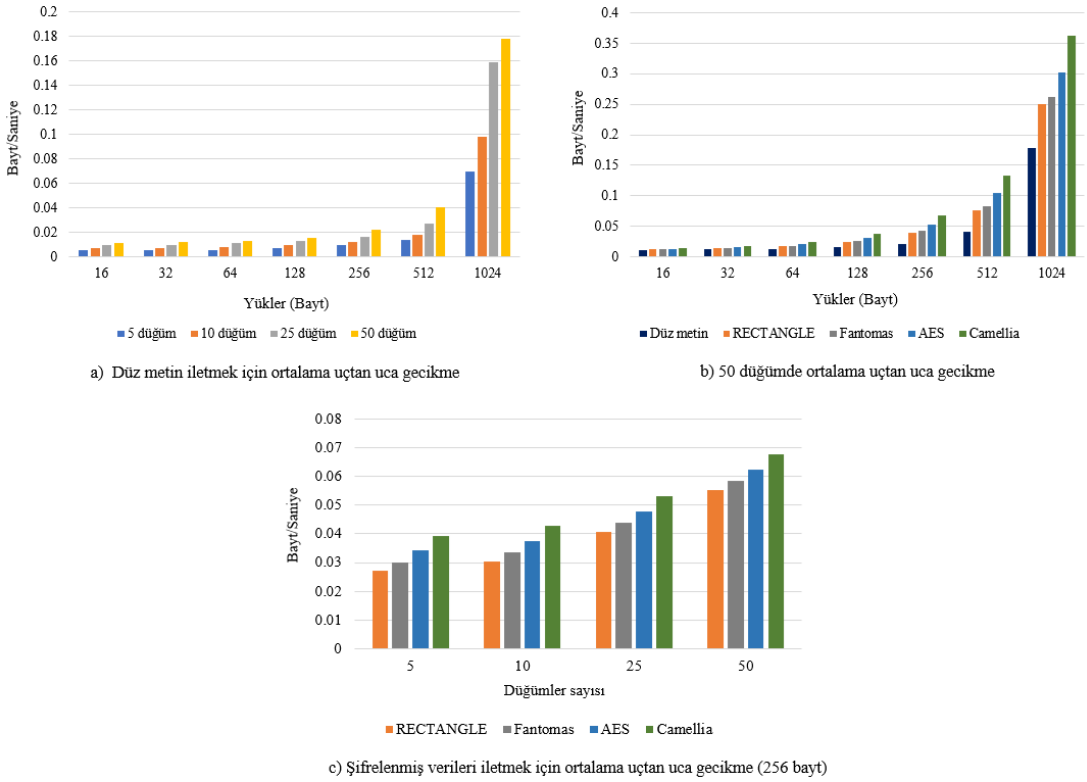



**Şekil 5.8.** Bellek (RAM ve ROM) kullanımları.

Şekil 5.9, ağ üzerinden güvensiz (Düz metin gönderme) ve güvenli (Şifreli metin gönderme) veri aktarımı için seçilen düğümler arasında uçtan uca gecikme senaryolarını göstermektedir. Uçtan uca gecikme, bir paketin ağ üzerinden kaynaktan hedefe aktarılması için geçen süredir. Uçtan uca gecikme, verilerin boyutundan ciddi bir şekilde etkilenir, bu nedenle mikro denetleyicinin algoritmayı çalıştırmak için ihtiyaç duyduğu süreyi azaltmak çok önemlidir. Şekil 5.9 (a), düz metinleri birden çok düğüm üzerinden iletmek için ortalama uçtan uca gecikmeyi temsil eder. Beklendiği gibi, 256 bayta kadar, grafik, tüm yükler için kademeli olarak yukarı hareketi gösterir. 50 düğüm için uçtan uca gecikme değeri, 1024 bayt sütünü için en üst noktaya ulaşır (Şekil 5.9 (b)). Genel olarak, düğümlerin artması, uçtan uca gecikme miktarında bir artışa yol açar.

RECTANGLE tüm yükler için minimum uçtan uca gecikmeye sahiptir (Şekil 5.9 (b) ve Şekil 5.9 (c)). Fantomas, AES ve Camellia sırasıyla RECTANGLE'i takip ediyor.

Dört algoritmanın uçtan uca gecikme açısından düzenlenmesi, çalışma süresi grafikleriyle eşleşmektedir.




a) Düz metin iletmek için ortalama uçtan uca gecikme

b) 50 düğümde ortalama uçtan uca gecikme

c) Şifrelenmiş verileri iletmek için ortalama uçtan uca gecikme (256 bayt)

**Şekil 5.9.** Ortalama uçtan uca gecikme karşılaştırması.

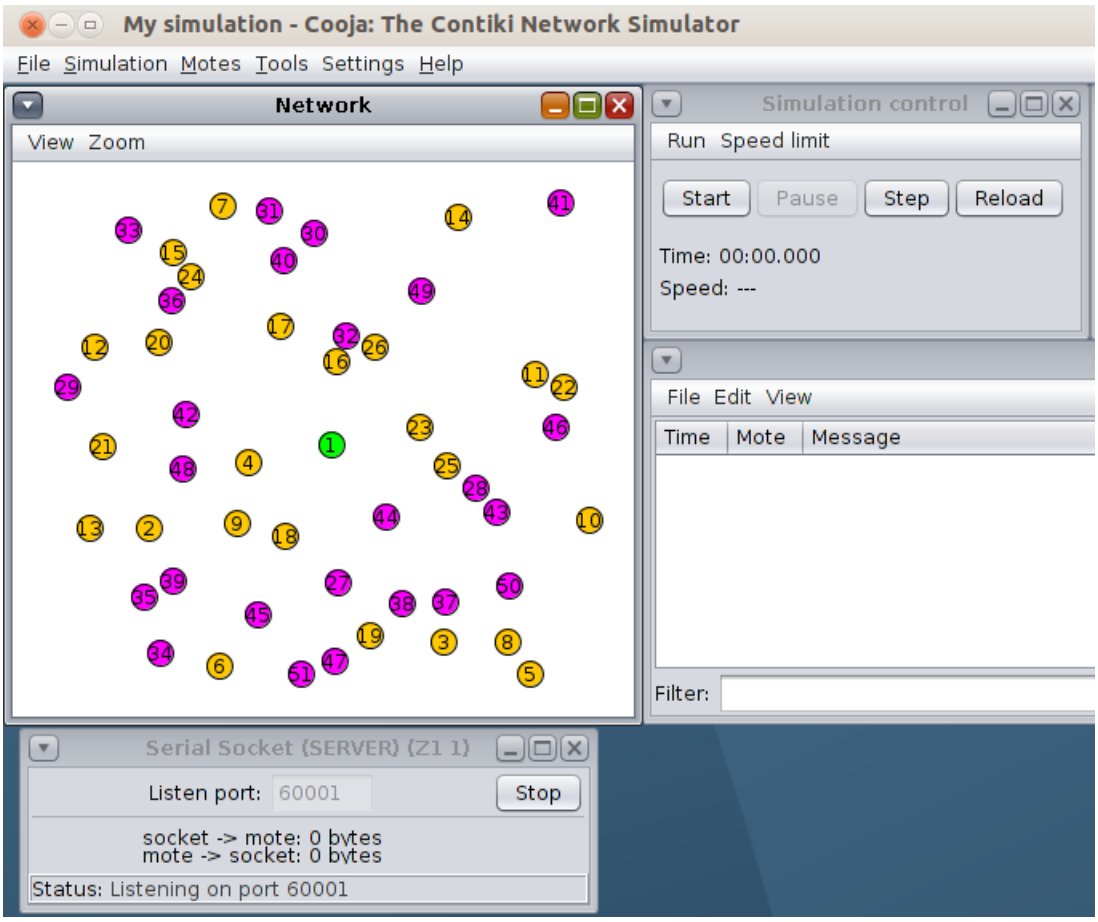
## 5.2. Contiki-Cooja Linux Uygulaması

Contiki, düşük güçlü kablosuz Nesnelerin İnterneti cihazlarına odaklanan, ağa bağlı, bellek kısıtlamalı sistemler için bir işletim sistemidir. Cooja, kablosuz algılayıcı ağlar için özel olarak tasarlanmış bir ağ simülatörüdür. MQTT-SN haberleşme standardı yaygın olarak kablosuz algılayıcı ağlarında kullanılmaktadır. Bir önceki bölümde MQTT-SN haberleşme protokollüne önerilen uçtan uca şifreleme yöntemi, Linux Ubuntu 14.04 ortamında, Contiki 3.0, Cooja simülatörü kullanarak gerçekleştirilmiştir. Testler Zolertia Z1 algılayıcı üzerinden gerçekleşmiştir. Z1, MSP430F2617 ultra düşük güç 16-bit MCU 16 MHz mikro denetleyici ile donatılmıştır. 2.4 GHz IEEE 802.15.4 (Zigbee) çalışıp, 6LowPAN uyumludur. Pille çalışabilir: 2xAA veya AAA pil. Z1, 8KB RAM ve 92KB Flash belleğe sahiptir. Dört (Camellia, AES, RECTANGLE, Fantomas) hafif siklet şifrelerin C kodları mikro denetleyiciye entegre edildi. Böylece, MQTT-SN mesajlaşma protokolde güvenli mod seçildiğinde, uçtan uca şifrelenmiş gerçekleşecektir. Tablo 5.2, simülasyon parametrelerini

göstermektedir. Düğümler 100*100 metrekare bir alanda rastgele dağılmıştır. Senaryolar, farklı mesaj boyutlarına 5, 10, 25 ve 50 düğüm üzerinde en az 5 defa çalıştırılmıştır. Kablosuz kanal modeli, Unit Disk Graph Medium (UDGM) modelidir. UDGM'de ağ topolojisi, düğüm konumlarını, aktarım aralığını, girişim aralığını ve aktarım oranını (Tx ve Rx) içerir. Cooja Simulator UDGM, yalnızca homojen bir ağ oluşturulduğunda kullanılır.

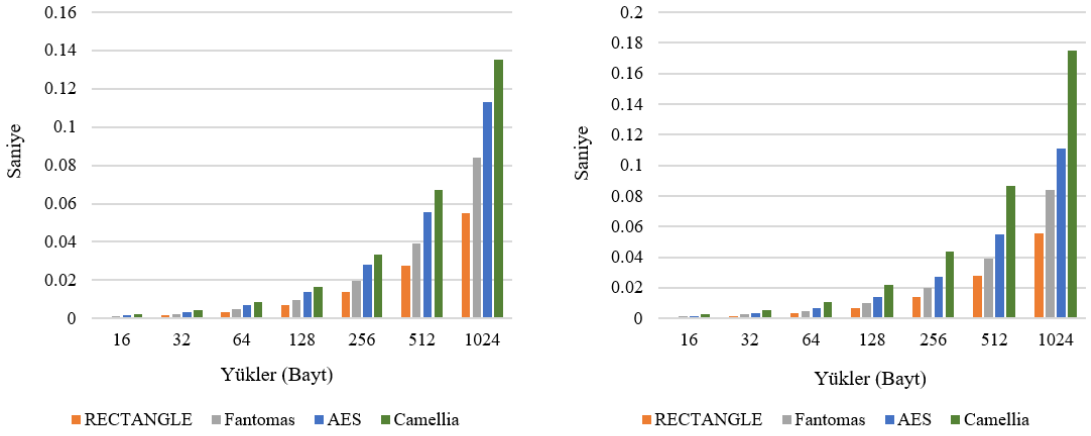
**Tablo 5.2.** Cooja simülasyon parametreleri.

| Parametre | Değer |
|---|---|
| Kablosuz kanal modeli | UDGM |
| MAC katmanı | CSMA + ContikiMAC |
| Protokol | 6LoWPAN/RPL |
| Taşıma protokolü | UDP |
| Düğüm sayısı | 5, 10, 25, 50 |
| Algılayıcı tipi | Zolertia Z1 |
| İletim Aralığı | 50 metre |
| Veri hızı | 250 kbit/s |
| Mesaj boyutu | 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024 Bayt |
| Düğümlerin frekansı | 2.4 GHz |
| Başlangıç enerjisi | 2 AA (1.5 V, 1600mAh) |
| Simülasyon süresi | 10 dakika |




**Şekil 5.10.** Örnek 50 düğüm Cooja simülasyonu.

Şekil 5.11 (a) ve Şekil 5.11 (b), sırasıyla Zolertia Z1 üzerinden şifreleme ve şifre çözme işlemleri için dört algoritma arasındaki ortalama çalıştırma sürelerini karşılaştırır. Çalıştırma sürelerini ölçmek için, Cooja simülatörde algılayıcılar menüsünden Z1 seçildi. Dört hafif şifrenin C kodları Z1 algılayıcının üzerinde derlenmiştir. Böylece tek bir Z1 algılayıcı üzerinde şifreleme ve şifre çözme fonksiyonlarının çalışma süresi elde edilmiştir. Deneyler beş iterasyon için tekrarlanmıştır. Şifreleme ve şifre çözme gafları (Şekil 5.11) dahil, RECTANGLE, tüm mesaj boyutları için minimum ve Camellia maksimum çalışma sürelerine sahipler. Sırasıyla, RECTANGLE, Fantomas, AES ve Camellia algoritmaların şifreleme ve şifre çözme fonksiyonları çalıştırma süreleri en azdan en yükseğe sıralanmışlar.




a) Şifreleme b) Şifre çözme

**Şekil 5.11.** Ortalama çalıştırma süreleri.

Zolertia Z1 platformu ve Cooja ağ uygulamaları için Şekil 5.12'de farklı mesaj boyutlarında şifreleme ve şifre çözme iş çıkarma oranlarını karşılaştırılmıştır. Grafikler, tüm yükler için en küçüğünden maksimum veriye kadar olan değerleri göstermektedir. İş çıkarma oranını hesaplamak için aşağıdaki denklemler uygulanmıştır:

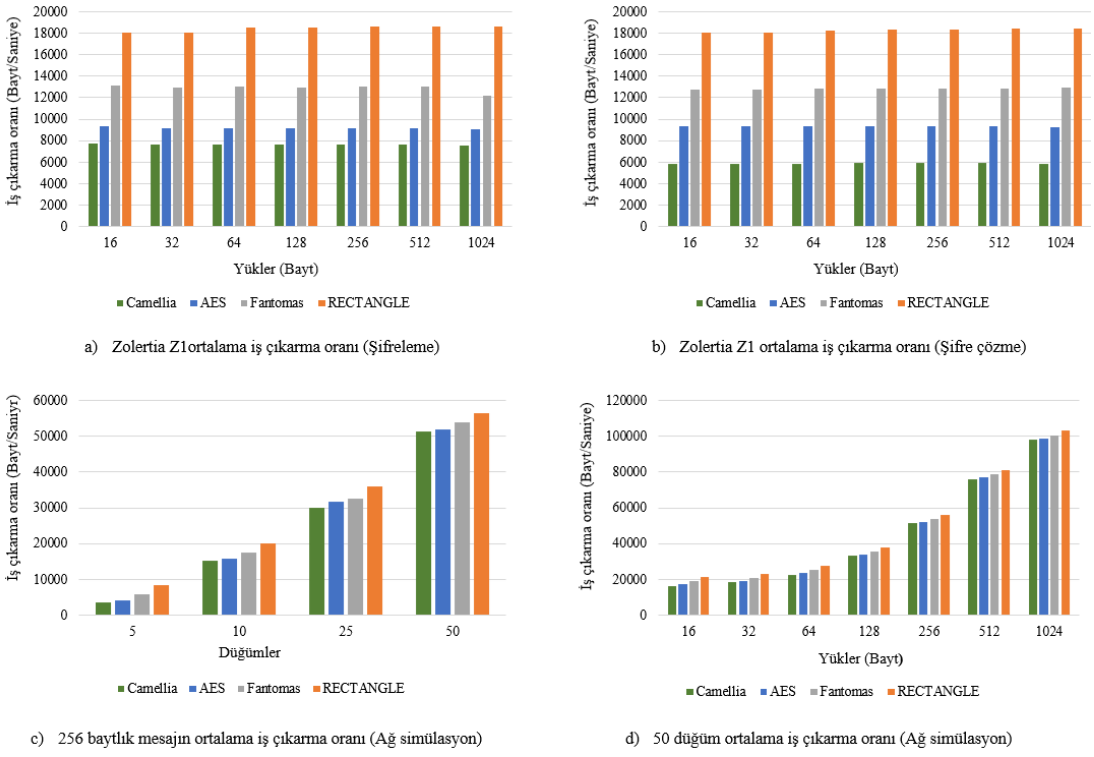
$$Şifreleme\ iş\ çıkarma\ oranı\ (Zolertia\ Z1)\ = \frac{N_B}{T_e} \tag{5.6}$$

$$Şifre\ çözme\ iş\ çıkarma\ oranı\ (Zolertia\ Z1)\ = \frac{N_B}{T_d} \tag{5.7}$$

$$İş\ çıkarma\ oranı\ (Cooja\ ağ) = \frac{N_D * P * 8}{T} \tag{5.8}$$

Denklem 5.6 ve 5.7'de $N_B$, blok boyutudur, $T_e$ ve $T_d$ sırasıyla şifreleme ve şifre çözme fonksiyonlar için çalıştırma süresini temsil etmektedir. Denklem 5.8'de (Cooja

simülasyon), $N_D$ teslim edilen paketlerin sayısıdır, P paket boyutu anlamına gelir ve T ise toplam simülasyon süresidir. Cooja ağ ortamında iş çıkarma oranını hesaplamak için gerekli C kodları komut dosyası düzenleyicisi (Script editor) menüsüne eklenmiştir. RECTANGLE algoritması, her iki grafikteki (5.12 (a) ve (b)) tüm mesaj uzunluklarına en yüksek iş çıkarma oranına sahiptir. RECTANGLE'dan sonra Fantomas, AES ve Camellia yer almaktalar. Her iki grafik için beklendiği gibi, Camellia minimum değere sahiptir. Beklendiği gibi tüm mesaj uzunlukları için Camellia en düşük iş çıkarma oranı değerine sahiptir. Sırasıyla tüm mesaj boyutları için en küçükten, Camellia, AES, Fantomas ve RECTANGLE olarak düzenlenebilir. En yüksek iş çıkarma oranı, daha verimli ağ anlamına gelir.




a) Zolertia Z1ortalama iş çıkarma oranı (Şifreleme)

b) Zolertia Z1 ortalama iş çıkarma oranı (Şifre çözme)

c) 256 baytlık mesajın ortalama iş çıkarma oranı (Ağ simülasyon)

d) 50 düğüm ortalama iş çıkarma oranı (Ağ simülasyon)

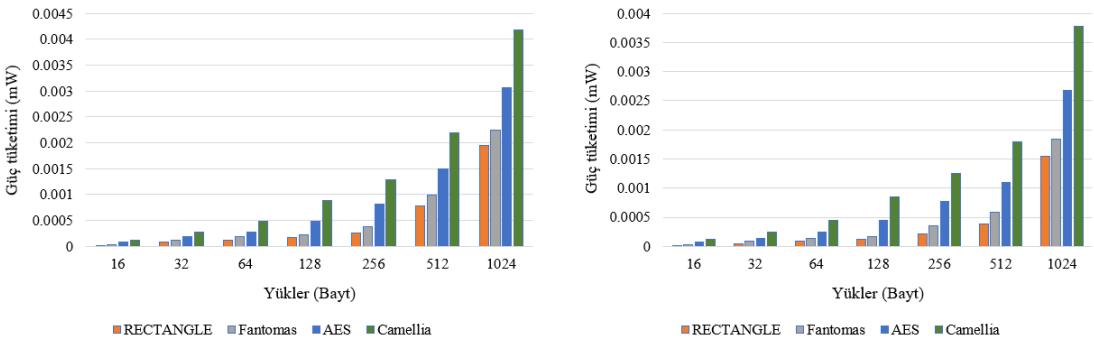
**Şekil 5.12.** Farklı senaryolar arasında iş çıkarma oranı karşılaştırması.

Ortalama enerji tüketimi Şekil 5.13'de görünmektedir. Cooja simülatöründeki enerji kullanımı ölçümü dört parametreye dayanıyor: İşlemci gücü, düşük güç modu (LPM), dinleme gücü ve iletim gücü. İşlemci gücü, düğüm tarafından gereken hesaplama enerjisini ifade eder. LPM güç, algılayıcı düğümün boş durumdayken kullanılan enerjiyi ifade eder. Dinleme gücü, algılayıcı düğümün komşu düğümlerinden veri paketini almaya hazır olduğu zaman gerekli olan enerjiyi ifade eder. İletim gücü, algılayıcı düğümün veri paketini komşularına iletmek için ihtiyaç duyduğu enerjiyi ifade eder. Enerji tüketimini hesaplamak için, ilk önce Z1 algılayıcının saniyedeki tik

sayısı kontrol edilmiştir (RTIMER_SECOND = 32768). Coojanın Powertrace uygulaması projenin Makefile dosyasına “APP += powertrace” komutu ile eklenmiştir. Kaynak dosyaya #include "powertrace.h" komutu eklendi. Güç tüketim profili her 10 saniyede bir “powertrace_start (CLOCK_SECOND * 10);” komutu ile ekranda yazılıp ve .log dosyası olarak kaydedilmiştir. Enerji tüketimi hesaplamak için aşağıdaki denklem kullanılmıştır:

$$Z1\ enerji\ tüketimi = \frac{Energes\_değeri * Akım * Voltaj}{RTIMER\_SECOND * Simülasyon\ zamanı} \quad (5.9)$$

Denklem 5.9’da “Energest” değeri elde edilen 10 saniyelik profil değerlerden, işlemci, LPM, TX ve RX değerleri için ayrı hesaplanmaktadır. Voltaj değeri 3 volt, TX akımı 17.4 mA, RX akımı 18.8 mA olarak Zolertia Z1 veri sayfasından referans alınmıştır. Şekil 5.13 (A ve b)’de RECTANGLE tüm mesaj uzunluklar için şifreleme ve şifre çözme işlemlerinde diğer algoritmalara kıyasla en düşük miktarda enerji tüketmektedir. Beklendiği gibi, Camellia, özellikle 512 bayttan sonra daha fazla enerji tüketir ve 1024 baytta maksimum değere ulaşır. 256 bayta kadar enerji tüketiminin tüm düğümler için arttığı görülmektedir ancak 512 bayttan sonra artış hızı daha da yükselir. Şekil 5.13 şifreleme ve şifre çözme işlemlerinde, sırasıyla RECTANGLE, Fantomas, AES ve Camellia güç tüketim değerleri en düşükten en yüksek miktara kadar görülmektedir.

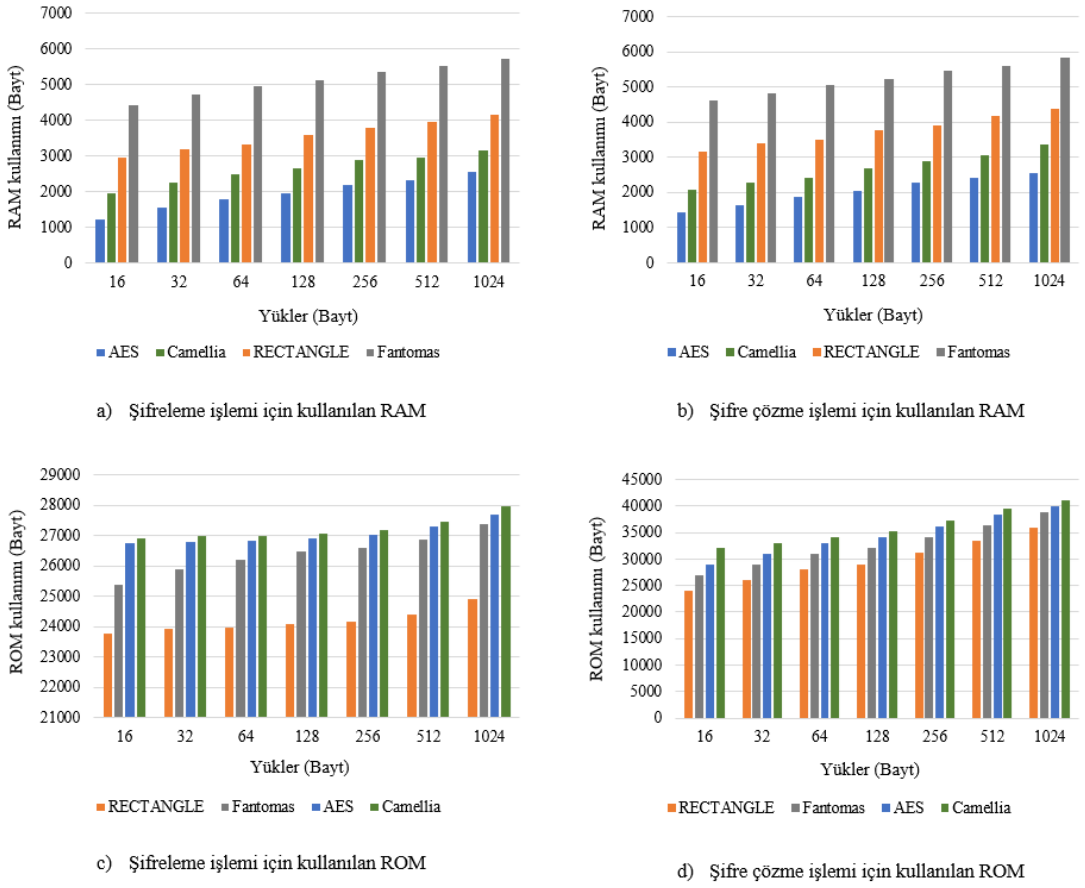



**Şekil 5.13**. Ortalama güç tüketim karşılaştırması.

Şekil 5.14 (a) ve Şekil 5.14 (b), şifreleme ve şifre çözme işlemleri için Cooja simülatörde RAM kullanımlarını temsil etmektedir. Bellek kullanımını ölçmek için msp430-size komutu kullanılmıştır. RAM kullanım açısından AES algoritması şifreleme ve şifre çözme grafiklerde en az tüketim miktarına sahiptir. Şifreleme ve şifre çözme işlemleri dahil, Fantomas maksimum RAM kullanımına sahiptir. Şekil

5.14 (a) ve 5.14 (b) için AES algoritmasından sonra, Camellia, RECTANGLE, Fantomas yer almaktadır.

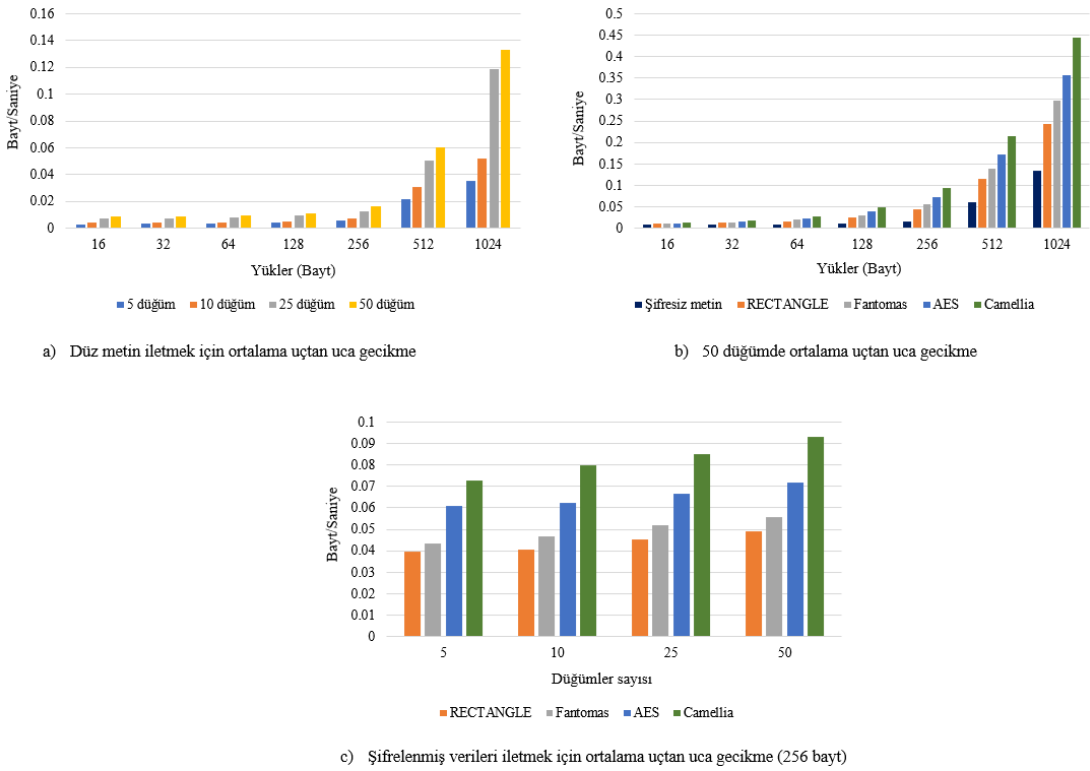
Şekil 5.14 (c) ve Şekil. 5.14 (d), Zolertia Z1 algılayıcının ROM (Kod boyutu) şifreleme ve şifre çözme kullanımlarını dört şifreleme algoritmasını uyguladıktan sonra göstermektedir. Şifreleme ve şifre çözme modlar dahil, RECTANGLE en düşük ROM'u kullanır ve Camellia diğer blok şifreler arasında en yüksek ROM kullanımına sahiptir. Fantomas, RECTANGLE'den sonra ikinci sırada yer almaktadır. En yüksek ROM kullanım şifreleme ve şifre çözme grafiklerinde Camellia algoritmasına aittir. Camellia'dan sonra AES ikinci sırada yer almaktadır.




**Şekil 5.14.** Bellek (RAM ve ROM) kullanımı.

Şekil 5.15, Cooja ağ üzerinden güvensiz (Düz metin gönderme) ve güvenli (Şifreli metin gönderme) veri aktarımı için seçilen düğümler arasında uçtan uca gecikme senaryolarını göstermektedir. Şekil 5.15 (a), beklendiği gibi, 256 bayta kadar, grafik, tüm yükler için kademeli olarak yukarı hareketi gösterir. 50 düğüm için uçtan uca gecikme değeri, 1024 bayt sütunu için en üst noktaya ulaşır (Şekil 5.15 (b)). Düğümlerin artması, uçtan uca gecikme miktarında bir artışa yol açmaktadır.

RECTANGLE tüm yükler için minimum uçtan uca gecikmeye sahiptir (Şekil 5.15 (b) ve Şekil 5.15 (c)). RECTANGLE' den sonra Fantomas, AES ve Camellia yer almaktadır. Dört algoritmanın uçtan uca gecikme açısından düzenlenmesi, çalışma süresi grafikleriyle eşleşmektedir.




a) Düz metin iletmek için ortalama uçtan uca gecikme

b) 50 düğümde ortalama uçtan uca gecikme

c) Şifrelenmiş verileri iletmek için ortalama uçtan uca gecikme (256 bayt)

**Şekil 5.15.** Ortalama uçtan uca gecikme karşılaştırması.

## 5.3. Bölüm Sonuçları

Bölüm 4'de önerilen çözümler, bu bölümde Windows ve Linux ortamlarında iki farklı simülasyon uygulamasında, iki ayrı algılayıcı (MICAz ve Zolertia Z1 algılayıcılar) üzerinde (Kablosuz algılayıcı ağlar ve MQTT-SN mesajlaşma protokolü) gerçekleştirilmiştir. Hafif şifreleme algoritmaları adı geçen algılayıcılarda uygulanarak uçtan uca şifreleme sağlanmıştır. Şifreleme ve şifre çözme gafları dahil, RECTANGLE, tüm mesaj boyutları için minimum ve Camellia maksimum çalışma sürelerine sahipler. Camellia en düşük iş çıkarma oranı değerine sahiptir. Sırasıyla tüm mesaj boyutları için en küçükten, Camellia, AES, Fantomas ve RECTANGLE olarak düzenlenebilir. Şifreleme ve şifre çözme işlemlerinde, sırasıyla RECTANGLE, Fantomas, AES ve Camellia güç tüketim değerleri en düşükten en yüksek miktara

kadar görülmektedir. Şifreleme ve şifre çözme işlemleri dahil, Fantomas maksimum RAM kullanımına sahiptir. RAM kullanım açısından, AES algoritmasından sonra, Camellia, RECTANGLE, Fantomas yer almaktadır. En yüksek ROM kullanım şifreleme ve şifre çözme grafiklerinde Camellia algoritmasına aittir. Camellia'dan sonra AES ikinci sırada yer almaktadır. RECTANGLE en düşük ROM'u kullanıyor. Uçtan uca gecikme açısından, RECTANGLE' den sonra Fantomas, AES ve Camellia en yüksek değerlere sahipler.

# 6. SONUÇLAR VE ANALİZLER

Bu doktora tezinde, IoT'nin alt kümesi olarak kabul edilen kablosuz algılayıcı ağları için hafif siklet şifreleme algoritmaları kullanarak, güvenli veri iletimi sağlanmıştır. Düşük güçlü IoT cihazlarda geleneksel şifreleme yöntemler ve algoritmaları doğrudan uygulamak zordur. Şifrelemek ve kodunu çözmek için çok sayıda tur gerektirir ve cihazlarda bulunan sınırlı enerjiyi boşa harcar. Hafif şifreleme algoritmalar, düşük maliyetli, saldırılara karşı dayanaklığı, daha az enerji tüketen, daha küçük paket boyutu olan ve daha az hesaplama yüküne sahipler.

Hafif algoritmalar hızlı bir şekilde uygulanabilir ve kaynak kısıtlamalı algılayıcı düğümleri için uygundur. AES 128 algoritması, bazı saldırılara karşı zayıflıkları olan Kablosuz Algılayıcı Ağlar (KAA) için kullanılabilen tek şifreleme algoritmasıdır. Farklı güvenlik taleplerine göre, hafif siklet şifreleme algoritmalar, uçtan uca şifreleme için önemli ölçüde tercih edilen çıkar yoludur.

Tezin amacı, IoT nesnelerin çalışması dikkate alınarak, yeni ve özgün haberleşme teknolojilerin geliştirmesi içermektedir. Bu doğrultuda, MQTT-SN haberleşme protokolü Kontrol Paketinde rezerve olan bitleri kullanarak, kullanıcı şifresiz veya şifreli modlarda tanımlanan hafif siklet algoritmalardan birini seçebilir. MQTT-SN mesaj paketi formatında 3 rezerve MsgType bit alanını kullanılarak adı geçen 3 algoritma MQTT-SN mesaj paketinde tanımlanmıştır. Mevcut hafif siklet algoritmalar arasından üç algoritma (RECTANGLE, Fantomas, Camellia) seçildi ve performans değerleri AES 128-bit algoritmasına karşı Linux (Cooja simülatör) ve Windows (Riverbed (OPNET) Modeler), iki farklı algılayıcı üzerinde (MICAz ve Zolertia Z1) ölçülmüştür. Windows'da her blok şifre tarafından kullanılan bellek (RAM & ROM) miktarını analiz etmek için Microchip Studio 7 kullanılmıştır. Linux ortamında bellek kullanım ölçümü msp430-size komutu ile gerçekleşmiştir.

Performans değerlendirmeler, farklı senaryolar için algılayıcılar üzerinde ve ağ ortamında bellek kullanımı, iş çıkama oranı, pil tüketimi ve uçtan uca gecikmeye dayalı olarak yapıldı ve karşılaşmıştır. Daha yüksek güvenlik, daha az karmaşıklık, daha az enerji tüketimi vb. gibi ayırıcı özelikler bir şifreleme algoritma seçiminde önde

gelen kriterlerdir. AES, seçilen algoritmalar arasında en yüksek güvenliğe sahiptir. Ancak daha fazla kaynak tüketmektedir. Güvenlik seviyesinin kullanıcı için daha az kritik olduğu zaman, ancak ağ ömrü ve pil kullanımı gibi sınırlı kaynakların verimli ve uzun ömürlü olması gerektiği durumlarda çözüm, hafif algoritmalardır. Camellia, ISO/IEC organizasyonu tarafından onaylanmıştır ve AES ile karşılaştırılabilir işlem yeteneklerine ve güvenlik seviyelerine sahiptir. RECTANGLE ve Fantomas, bitslice tekniğini kullanan yüksek hızlı yazılım uygulamasına sahiptir ve bu özellik onları çevrimiçi (Online) uygulamalar için iyi bir seçim haline getirmektedir.

Riverbed Modeler ve Cooja ortamlarında yapılan simülasyonlar sonucunda, ortalama çalıştırma süresini karşılaştırmada en düşükten en yükseğe algoritmalar RECTANGLE, Fantomas, AES ve Camellia olarak sıralanmaktadır. RECTANGLE, MICAz ve Z1 algılayıcılarda en hızlı şekilde şifrele ve şifre çözme fonksiyonları çalıştırır. Camellia listenin sonunda yer almaktadır.

Cooja ve Riverbed simülatörlerde MICAz ve Z1 algılayıcılar üzerinde yapılan simülasyon sonuçlarına göre, ortalama iş çıkarma oranı (Şifreleme ve şifre çözme işlemleri dahil) dört algoritma Camellia, AES, Fantomas ve RECTANGLE olarak sıralanmaktadır. RECTANGLE her iki cihazda listenin sonunda yer almaktadır. Camellia algoritmalar arasında en iyi iş çıkarma oranına sahiptir.

Şifreleme ve şifre çözme işlemlerinde iki algılayıcı için, ortalama güç tüketim sıralaması RECTANGLE, Fantomas, AES, Camellia şeklindedir. Beklendiği gibi RECTANGLE en az enerji tüketmektedir ve Camellia mevcut algoritmalar arasında en yüksek güç tüketimine sahiptir.

Dört algoritmanın RAM kullanımını açısından Windows ve Linux ortamlarında yapılan ölçmeler sonucunda algoritmalar AES, Camellia, RECTANGLE ve Fantomas olarak sıralamıştır. Şifreleme ve şifre çözme işlemleri dahil, AES minimum ve Fantomas maksimum RAM kullanımına sahipler.

Linux ve Windows'da elde edilen ROM kullanım değerlere göre RECTANGLE en az ve Camellia en çok ROM kullanıyor. MICAz ve Z1 algılayıcılar üzerinde yapılan ölçümlerde dört algoritma sırasıyla en azdan çoğa doğru RECTANGLE, Fantomas, AES ve Camellia olarak görülmektedir.

MICAz ve Z1 algılayıcıları kullanarak mesaj uzunluğuna göre ortalama uçtan uca gecikme sıralamasını RECTANGLE, Fantomas, AES ve Camellia olarak

görünmektedir. RECTANGLE algoritması için uçtan uca gecikme değerleri minimum ve Camellia en yüksek uçtan uca gecikme değerlere sahipler.

Tez çalışmasında çeşitli hafif siklet blok şifreler incelenip, IoT uygulama geliştiriciler için donanımlara uygun algoritma seçimi için yol gösterilmiştir. Ayrıca, Önerilen şema, IoT'nin bir alt kümesi kabul edilen KAA'lar için yazılım tabanlı bir güvenlik çözümü olarak adil bir ölçüm ve karşılaştırma yapmaktadır. Kullanıcı istekleri veya artırılmış BER gibi çeşitli uygulama güvenlik gereksinimlerine göre önerilen şema uçtan uca şifreleme yöntemi ile hassas verilerin gizliliğini korunmaktadır.

## KAYNAKLAR


[1] Doç. Dr. Cüneyt BAYILMIŞ ve Doç. Dr. Kerem KÜÇÜK- Nesnelerin İnternet'i: Teori ve Uygulamaları- Papatya Bilim- pp.240 – 2019.

[2] Vaidya, B.; Mouftah, H.T.: IoT applications and services for connected and autonomous electric vehicles. Arab. J. Sci. Eng. 45, 2559–2569 (2020).

[3] Goyal, Krishan Kumar, Amit Garg, Ankur Rastogi, and Saurabh Singhal. "A literature survey on Internet of Things (IoT)." International Journal of Advanced Networking and Applications 9, no. 6 (2018): 3663-3668.

[4] https://www.owasp.org/images/1/1c/OWASP-IoT-Top-10-2018-final.pdf

[5] Babar, Sachin, Parikshit Mahalle, Antonietta Stango, Neeli Prasad, and Ramjee Prasad. "Proposed security model and threat taxonomy for the Internet of Things (IoT)." In International Conference on Network Security and Applications, pp. 420-429. Springer, Berlin, Heidelberg, 2010.

[6] Souissi, I., Azzouna, N. B., & Said, L. B. (2019). A multi-level study of information trust models in WSN-assisted IoT. Computer Networks, 151, 12-30

[7] Burhanuddin, M. A., Ali Abdul-Jabbar Mohammed, Ronizam Ismail, Mustafa Emad Hameed, Ali Noori Kareem, and Halizah Basiron. "A review on security challenges and features in wireless sensor networks: IoT perspective." Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering (JTEC) 10, no. 1-7 (2018): 17-21.

[8] Grosso V., Leurent G., Standaert FX., Varıcı K. (2015) LS-Designs: Bitslice Encryption for Efficient Masked Software Implementations. In: Cid C., Rechberger C. (eds) Fast Software Encryption. FSE 2014. Lecture Notes in Computer Science, vol 8540. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-46706-0_2

[9] Zhang, W., Bao, Z., Lin, D., Rijmen, V., Yang, B., & Verbauwhede, I. (2015). RECTANGLE: a bit-slice lightweight block cipher suitable for multiple platforms. Science China Information Sciences, 58(12), 1-15.

[10] Aoki K, Ichikawa T, Kanda M, Matsui M, Moriai S, Nakajima J, Tokita T. Camellia: A 128-bit block cipher suitable for multiple platforms—design andanalysis. InInternational workshop on selected areas in cryptography 2000 Aug 14 (pp. 39-56). Springer, Berlin, Heidelberg.

[11] Isobe T., Shibutani K. (2012) Security Analysis of the Lightweight Block Ciphers XTEA, LED and Piccolo. In: Susilo W., Mu Y., Seberry J. (eds) Information Security and Privacy. ACISP 2012. Lecture Notes in Computer Science, vol 7372. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31448-3_6

[12] M. Cazorla, K. Marquet and M. Minier, "Survey and benchmark of lightweight block ciphers for wireless sensor networks," 2013 International Conference on Security and Cryptography (SECRYPT), Reykjavik, Iceland, 2013, pp. 1-6.

[13] Panahi, P., Bayılmış, C., Çavuşoğlu, U. et al. Performance Evaluation of Lightweight Encryption Algorithms for IoT-Based Applications. Arab J Sci Eng (2021). https://doi.org/10.1007/s13369-021-05358-4

[14] Deebak, B. D., & Al-Turjman, F. (2020). A hybrid secure routing and monitoring mechanism in IoT-based wireless sensor networks. Ad Hoc Networks, 97, 102022.

[15] Gopalakrishnan, K. (2020). Security Vulnerabilities and Issues of Traditional Wireless Sensors Networks in IoT. In Principles of Internet of Things (IoT) Ecosystem: Insight Paradigm (pp. 519-549). Springer, Cham.

[16] Pawar, R., & Kalbande, D. R. (2019, October). Elliptical Curve Cryptography Based Access Control Solution for IoT Based WSN. In International Conference on Innovative Data Communication Technologies and Application (pp. 742-749). Springer, Cham.

[17] Maw, Htoo Aung, Hannan Xiao, Bruce Christianson, and James A. Malcolm. "A survey of access control models in wireless sensor networks." Journal of Sensor and Actuator Networks 3, no. 2 (2014): 150-180.

[18] Tabassum, A., Sadaf, S., Sinha, D., & Das, A. K. (2020). Secure Anti-Void Energy-Efficient Routing (SAVEER) Protocol for WSN-Based IoT Network. In Advances in Computational Intelligence (pp. 129-142). Springer, Singapore.

[19] Poongavanam, N., Lathaparthiban, P., Vadivelu, K., Sathiyamoorthi, H., & Balaji, N. (2018). A SURVEY ON ATTACKS AND SECURITY GOALS IN WSN. International Journal of Pure and Applied Mathematics, 119(14), 1641-1646.

[20] Hassan, Nabaa A., and Alaa K. Farhan. "Security improve in ZigBee protocol based on RSA public algorithm in WSN." Engineering and Technology Journal 37, no. 3B (2019): 67-73.

[21] Ghani, A., Mansoor, K., Mehmood, S., Chaudhry, S. A., Rahman, A. U., & Najmus Saqib, M. (2019). Security and key management in IoT-based wireless sensor networks: An authentication protocol using symmetric key. International Journal of Communication Systems, 32(16), e4139.

[22] Li, X., Niu, J., Kumari, S., Wu, F., Sangaiah, A. K., & Choo, K. K. R. (2018). A three-factor anonymous authentication scheme for wireless sensor networks in internet of things environments. Journal of Network and Computer Applications, 103, 194-204.

[23] Abdulkader, O., Bamhdi, A. M., Thayananthan, V., Jambi, K., & Alrasheedi, M. (2018, February). A novel and secure smart parking management system (SPMS) based on integration of WSN, RFID, and IoT. In 2018 15th Learning and Technology Conference (L&T) (pp. 102-106). IEEE.

[24] Othman, A., & Maga, D. (2018, October). Relation between security and energy consumption in wireless sensor network (WSN). In 2018 New Trends in Signal Processing (NTSP) (pp. 1-8). IEEE.

[25] Zirem, A., & Senouci, M. R. (2018, October). Efficient lightweight chaotic secure communication system for WSNs and IoT. In 2018 International Conference on Smart Communications in Network Technologies (SaCoNeT) (pp. 43-48). IEEE.

[26] Abbou, A. N., Baddi, Y., & Hasbi, A. (2018, October). Software defined networks in internet of things integration security: Challenges and solutions. In 2018 6th International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM) (pp. 1-6). IEEE.

[27] Dwivedi, R. K., Saran, M., & Kumar, R. (2019, January). A survey on security over sensor-cloud. In 2019 9th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering (Confluence) (pp. 31-37). IEEE.

[28] Teguig, E. H., & Touati, Y. (2018, November). Security in Wireless Sensor Network and IoT: An Elliptic Curves Cryptosystem based Approach. In 2018 9th IEEE Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON) (pp. 526-530). IEEE.

[29] Smys, S. (2019). Energy-aware security routing protocol for WSN in big-data applications. Journal of ISMAC, 1(01), 38-55.

[30] Abidin, S. (2018, August). Enhancing Security in WSN by Artificial Intelligence. In International Conference on Intelligent Data Communication Technologies and Internet of Things (pp. 814-821). Springer, Cham.

[31] Abirami, S. (2019). A complete study on the security aspects of wireless sensor networks. In International Conference on Innovative Computing and Communications (pp. 223-230). Springer, Singapore.

[32] Dewal, P., Narula, G. S., Jain, V., & Baliyan, A. (2018). Security Attacks in Wireless Sensor Networks: A Survey. In Cyber Security (pp. 47-58). Springer, Singapore.

[33] Mugheri, A. A., Siddiqui, M. A., & Khoso, M. (2018). Analysis on Security Methods of Wireless Sensor Network (WSN). Sukkur IBA Journal of Computing and Mathematical Sciences, 2(1), 52-60.

[34] Patil, S., & Lilhare, P. (2019). Security Issues and Challenges in Wireless Sensor Networks. Proceedings of Recent Advances in Interdisciplinary Trends in Engineering & Applications (RAITEA).

[35] Tsai, K. L., Leu, F. Y., Su, T. H., & Chang, Y. C. (2017, November). A light weight data encryption method for WSN communication. In International Conference on Broadband and Wireless Computing, Communication and Applications (pp. 788-795). Springer, Cham.

[36] Sumalatha, M. S., & Nandalal, V. (2020). An intelligent cross layer security based fuzzy trust calculation mechanism (CLS-FTCM) for securing wireless sensor network (WSN). Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 1-15.

[37] Haseeb, K., Almogren, A., Islam, N., Ud Din, I., & Jan, Z. (2019). An energy-efficient and secure routing protocol for intrusion avoidance in IoT-based WSN. Energies, 12(21), 4174.

[38] Sharma, Kalpana, and M. K. Ghose. "Cross layer security framework for wireless sensor networks." International Journal of Security and Its Applications 5, no. 1 (2011): 39-52.

[39] Gawdan, Idrees Sarhan, Chee-Onn Chow, Tanveer A. Zia, and I. Gawdan. "Cross-layer based security solutions for wireless sensor networks." International Journal of Physical Sciences 6, no. 17 (2011): 4245-4254.

[40] Mendes, Lucas DP, and Joel JPC Rodrigues. "A survey on cross-layer solutions for wireless sensor networks." Journal of Network and Computer Applications 34, no. 2 (2011): 523-534.

[41] Devi, C. Dhivya, and K. Vidya. "A survey on cross-layer design approach for secure wireless sensor networks." In International conference on innovative computing and communications, pp. 43-59. Springer, Singapore, 2019.

[42] Boubiche, D.E., Athmani, S., Boubiche, S. et al. Cybersecurity Issues in Wireless Sensor Networks: Current Challenges and Solutions. Wireless Pers Commun 117, 177–213 (2021). https://doi.org/10.1007/s11277-020-07213-5

[43] Khashan, Osama A., Rami Ahmad, and Nour M. Khafajah. "An automated lightweight encryption scheme for secure and energy-efficient communication in wireless sensor networks." Ad Hoc Networks 115 (2021): 102448.

[44] Kardi A., Zagrouba R. (2021) Hybrid Cryptography Algorithm for Secure Data Communication in WSNs: DECRSA. In: Sharma H., Saraswat M., Yadav A., Kim J.H., Bansal J.C. (eds) Congress on Intelligent Systems. CIS 2020. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 1334. Springer.

[45] Wang J, Gao Y, Yin X, Li F, Kim HJ. An enhanced PEGASIS algorithm with mobile sink support for wireless sensor networks. Wireless Communications and Mobile Computing. 2018 Dec 2;2018.

[46] Tabatabaei S. A Novel Fault Tolerance Energy-Aware Clustering Method via Social Spider Optimization (SSO) and Fuzzy Logic and Mobile Sink in Wireless Sensor Networks (WSNs). Comput. Syst. Sci. Eng.. 2020;35(6):477-94.

[47] Wang J, Gao Y, Zhou C, Sherratt S, Wang L. Optimal coverage multi-path scheduling scheme with multiple mobile sinks for WSNs. Computers, Materials & Continua. 2020 Jan 10;62(2):695-711.

[48] Vijayalakshmi K, Anandan P. Global levy flight of cuckoo search with particle swarm optimization for effective cluster head selection in wireless sensor network. Intelligent Automation and Soft Computing. 2020 Jan 1;26(2):303-11.

[49] Radosavljević N, Babić D. Power Consumption Analysis Model in Wireless Sensor Network for Different Topology Protocols and Lightweight Cryptographic Algorithms. Journal of Internet Technology. 2021 Jan 1;22(1):71-80.

[50] Lara-Nino CA, Diaz-Perez A, Morales-Sandoval M. Energy and area costs of lightweight cryptographic algorithms for authenticated encryption in WSN. Security and Communication Networks. 2018 Sep 4;2018.

[51] Anisha Mahato, Dr. M. Pushpalatha "A Lightweight Cryptosystem for Wireless Sensor Networks using ECC" International Journal of Engineering Trends and Technology 68.4(2020):7-12.

[52] Kalyane SJ, Patil NB. Lightweight & Energy Efficient Secure Data Transmission in WSN. International Journal of Advanced Networking and Applications. 2019 Sep 1;11(2):4205-12.

[53] Dutta, I. K., Ghosh, B., Bayoumi, M. 2019. "Lightweight Cryptography for Internet of Insecure Things: A Survey", IEEE 9th Annual Computing and Communication Workshop and Conference, 475-481.

[54] Malina, L., Hajny, J., Fujdiak, R., Hosek, J. 2016. “On perspective of security and privacy-preserving solutions in the internet of things”, Computer Networks, 102, 83-95.

[55] Sciancalepore, S., Piro, G., Vogli, E., Boggia, G., Grieco, L.A., Cavone, G. 2016. “LICITUS: A lightweight and standard compatible framework for securing layer-2 communications in the IoT”, Computer Networks, 108, 66-77.

[56] Raza, S., Shafagh, H., Hewage, K., Hummen, R., Voigt, T. 2013. “Lithe: Lightweight Secure CoAP for the Internet of Things”, IEEE Sensor Journal, 13(10), 3711-3720.

[57] Singh, M., MA, R., VL, S., Balamuralidhar, P. 2015. “Secure MQTT for Internet of Things (IoT), 2015 Fifth International Conference on Communications Systems and Network Technologies, 746-751.

[58] Mektoubi, A., Hassani, H. L., Belhadaoui, H., Rifi, M., Zakari, A. 2016. “New approach for securing communication over MQTT protocol A comparison between RSA and Elliptic Curve”, Third International Conference on System of Collaboration (SysCo), 1-6.

[59] Panahi, P., Bayılmış, C., Çavuşoğlu, U., Kaçar, S. 2019. “Comparing PRESENT and LBlock block ciphers over IoT Platform”, 12th International Conference on Information Security and Cryptology, 66-69.

[60] Panahi, P., Bayılmış, C., Çavuşoğlu, U., Kaçar, S. 2018 “Performance Evaluation of L-Block Algorithm for IoT Applications”, 3. Uluslararası Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Konferansı (UBMK2018), 609-612.

[61] Bayilmis, C., Cavusoglu, U., Akgul, A., Kacar, S., Sevin, A. 2017. “Enhanced Secure Data Transfer for WSN Using Chaotic-Based Encryption”, Technical Gazette, 24(4), 1065-1069.

[62] Bayilmis, C., Cavusoglu, U., Akgul, A., Sevin, A., Kacar, S. 2014. "Employing Chaotic Encryption for IEEE 802.15.4-based LR-WPANs", International Conference on Computer Science and Information Systems (ICSIS’2014), 89-92.

[63] Çakıroğlu, M., Bayılmış, C., Özcerit, A.T., Çetin, Ö. 2010."Performance evaluation of scalable encryption algorithm for wireless sensor networks", Scientific Research and Essays, 5(9), 856-861.

[64] Bayılmış, C., Çakıroğlu, M. 2008. "SEA Şifreleme Algoritması Kullanarak Güvenli Kablosuz Algılayıcı Ağ Haberleşmesinin Gerçekleştirilmesi", 3. Uluslararası Katılımlı Bilgi Güvenliği ve Kriptoloji Konferansı", 173-177.

[65] Bandırmalı, N., Ertürk, İ., Çeken, C., Bayılmış, C. 2008. "Skipjack Şifreleme Algoritması Kullanarak Gecikme Duyarlı ve Enerji Etkin Kablosuz Algılayıcı Ağ Güvenlik Hizmeti", Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu ELECO 2008, 152-157.

[66] Uras Panahi, Cüneyt Bayılmış, “Enabling secure data transmission for wireless sensor networks based IoT applications”, Ain Shams Engineering Journal, 2022, 101866, ISSN 2090-4479, https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101866.

[67] Hassan, Syed Ali, Sidra Shaheen Syed, and Fatima Hussain. "Communication technologies in IoT networks." In Internet of Things, pp. 13-26. Springer, Cham, 2017.

[68] Soni, Dipa, and Ashwin Makwana. "A survey on mqtt: a protocol of internet of things (iot)." In International conference on telecommunication, power analysis and computing techniques (ICTPACT-2017), vol. 20, pp. 173-177. 2017.

[69] Park, Chang-Seop, and Hye-Min Nam. "Security architecture and protocols for secure MQTT-SN." IEEE Access 8 (2020): 226422-226436.

[70] Vinoski, Steve. "Advanced message queuing protocol." IEEE Internet Computing 10, no. 6 (2006): 87-89.

[71] Luzuriaga, Jorge E., Miguel Perez, Pablo Boronat, Juan Carlos Cano, Carlos Calafate, and Pietro Manzoni. "A comparative evaluation of AMQP and MQTT protocols over unstable and mobile networks." In 2015 12th Annual IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), pp. 931-936. IEEE, 2015.

[72] Al-Masri, Eyhab, Karan Raj Kalyanam, John Batts, Jonathan Kim, Sharanjit Singh, Tammy Vo, and Charlotte Yan. "Investigating messaging protocols for the Internet of Things (IoT)." IEEE Access 8 (2020): 94880-94911.

[73] Bendel, Sven, Thomas Springer, Daniel Schuster, Alexander Schill, Ralf Ackermann, and Michael Ameling. "A service infrastructure for the Internet of Things based on XMPP." In 2013 IEEE international conference on pervasive computing and communications workshops (PERCOM Workshops), pp. 385-388. IEEE, 2013.

[74] Rahman, Reem Abdul, and Babar Shah. "Security analysis of IoT protocols: A focus in CoAP." In 2016 3rd MEC international conference on big data and smart city (ICBDSC), pp. 1-7. IEEE, 2016.

[75] https://stomp.github.io/

[76] Mesnil, Jeff. Mobile and Web Messaging: Messaging Protocols for Web and Mobile Devices. " O'Reilly Media, Inc.", 2014.

[77] Setiawan, Herri, Andi Abdul Adhiem Sumitro, and Rendra Gustriansyah. "The change data capture and the web application messaging protocol on the real time dashboard." International Journal of Engineering and Advanced Technology 8, no. 4 (2019).

[78] Lehnhoff, Sebastian, Sebastian Rohjans, Mathias Uslar, and Wolfgang Mahnke. "OPC unified architecture: A service-oriented architecture for smart grids." In 2012 First International Workshop on Software Engineering Challenges for the Smart Grid (SE-SmartGrids), pp. 1-7. IEEE, 2012.

[79] Rao, Suhas, Devaiah Chendanda, Chetan Deshpande, and Vishwas Lakkundi. "Implementing LWM2M in constrained IoT devices." In 2015 IEEE Conference on Wireless Sensors (ICWiSe), pp. 52-57. IEEE, 2015.

[80] Borda, Monica. "Cryptography Basics." In Fundamentals in Information Theory and Coding, pp. 121-208. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.

[81] Daemen, Joan, and Vincent Rijmen. "AES proposal: Rijndael." (1999).

[82] Bogdanov, Andrey, Lars R. Knudsen, Gregor Leander, Christof Paar, Axel Poschmann, Matthew JB Robshaw, Yannick Seurin, and Charlotte Vikkelsoe. "PRESENT: An ultra-lightweight block cipher." In International workshop on cryptographic hardware and embedded systems, pp. 450-466. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007.

[83] Borghoff, Julia, Anne Canteaut, Tim Güneysu, Elif Bilge Kavun, Miroslav Knezevic, Lars R. Knudsen, Gregor Leander et al. "PRINCE–a low-latency block cipher for pervasive computing applications." In International conference on the theory and application of cryptology and information security, pp. 208-225. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012.

[84] Beaulieu, Ray, Douglas Shors, Jason Smith, Stefan Treatman-Clark, Bryan Weeks, and Louis Wingers. "The SIMON and SPECK lightweight block ciphers." In Proceedings of the 52nd annual design automation conference, pp. 1-6. 2015.

[85] Hong, Deukjo, Jaechul Sung, Seokhie Hong, Jongin Lim, Sangjin Lee, Bon-Seok Koo, Changhoon Lee et al. "HIGHT: A new block cipher suitable for low-resource device." In International workshop on cryptographic hardware and embedded systems, pp. 46-59. Springer, Berlin, Heidelberg, 2006.

[86] Wu, Wenling, and Lei Zhang. "LBlock: a lightweight block cipher." In International conference on applied cryptography and network security, pp. 327-344. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.

[87] Cruz, Rafael J., Antonio Guimarães, and Diego F. Aranha. "Efficient and secure software implementations of Fantomas." Journal of Cryptographic Engineering 10, no. 3 (2020): 211-228.

[88] Bansod, G., Pisharoty, N. and Patil, A., 2017. BORON: an ultra-lightweight and low power encryption design for pervasive computing. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 18(3), pp.317-331.

[89] Salunke R., Bansod G., Naidu P. (2019) Design and Implementation of a Lightweight Encryption Scheme for Wireless Sensor Nodes. In: Arai K., Bhatia R., Kapoor S. (eds) Intelligent Computing. CompCom 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing, vol 998.

[90] Hosseinzadeh, Jaber, and Abbas Ghaemi Bafghi. "Software Implementation and Evaluation of Lightweight Symmetric Block Ciphers of the Energy Perspectives and Memory." arXiv preprint arXiv:1706.03909 (2017).

[91] Singh, Praneet, and Kedar Deshpande. "Performance Evaluation of Cryptographic Ciphers on IoT Devices." arXiv preprint arXiv:1812.02220 (2018).

[92] Appel, Michael, et al. "Block ciphers for the IoT–SIMON, SPECK, KATAN, LED, TEA, PRESENT, and SEA compared." (2016).

[93] Grossschadl, Johann, Stefan Tillich, Christian Rechberger, Michael Hofmann, and Marcel Medwed. "Energy evaluation of software implementations of block ciphers under memory constraints." In 2007 Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition, pp. 1-6. IEEE, 2007.

[94] Botta, Miroslav, Milan Simek, and Nathalie Mitton. "Comparison of hardware and software based encryption for secure communication in wireless sensor networks." 2013 36th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP). IEEE, 2013.

[95] C. A. Lara-Niño, M. Morales-Sandoval and A. Díaz-Pérez, "An evaluation of AES and present ciphers for lightweight cryptography on smartphones," 2016 International Conference on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP), Cholula, 2016, pp. 87-93.

[96] Kotel, Sonia, Fatma Sbiaa, Medien Zeghid, Mohsen Machhout, Adel Baganne, and Rached Tourki. "Performance evaluation and design considerations of lightweight block cipher for low-cost embedded devices." In 2016 IEEE/ACS 13th International Conference of Computer Systems and Applications (AICCSA), pp. 1-7. IEEE, 2016.

[97] Diehl, William, Farnoud Farahmand, Panasayya Yalla, Jens-Peter Kaps, and Kris Gaj. "Comparison of hardware and software implementations of selected lightweight block ciphers." In 2017 27th International Conference on Field Programmable Logic and Applications (FPL), pp. 1-4. IEEE, 2017.

[98] Shah, Ankit, and Margi Engineer. "A survey of lightweight cryptographic algorithms for iot-based applications." Smart Innovations in Communication and Computational Sciences. Springer, Singapore, 2019. 283-293.

[99] Sehrawat, Deepti, and Nasib Singh Gill. "Performance Evaluation of Newly Proposed Lightweight Cipher, BRIGHT.", International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT), ISSN: 2249-8958, Volume-8 Issue-5, June 2019.

[100] Doomun, M. Razvi, and K. M. S. Soyjaudah. "Analytical Comparison of Cryptographic Techniques for Resource-constrained Wireless Security." IJ Network Security 9, no. 1 (2009): 82-94.

[101] Batina, Lejla, Amitabh Das, Barış Ege, Elif Bilge Kavun, Nele Mentens, Christof Paar, Ingrid Verbauwhede, and Tolga Yalçın. "Dietary recommendations for lightweight block ciphers: power, energy and area analysis of recently developed architectures." In International Workshop on Radio Frequency Identification: Security and Privacy Issues, pp. 103-112. Springer, 2013.

[102] Lee, W. K., Raphael C-W. Phan, and B. M. Goi. "Fast and Energy-Efficient Block Ciphers Implementations in ARM Processors and Mali GPU." IETE Journal of Research (2020): pp.1-8.

[103] Hatzivasilis, George, Konstantinos Fysarakis, Ioannis Papaefstathiou, and Charalampos Manifavas. "A review of lightweight block ciphers." Journal of Cryptographic Engineering 8, no. 2 (2018): 141-184.

[104] Malina, Lukas, Vlastimil Clupek, Zdenek Martinasek, Jan Hajny, Kimio Oguchi, and Vaclav Zeman. "Evaluation of software-oriented block ciphers on smartphones." In International Symposium on Foundations and Practice of Security, pp. 353-368. Springer, Cham, 2013.

[105] Omrani, Tasnime, Rhouma Rhouma, and Layth Sliman. "Lightweight cryptography for resource-constrained devices: a comparative study and rectangle cryptanalysis." In International Conference on Digital Economy, pp. 107-118. Springer, Cham, 2018.

[106] Ertaul, Levent, and Sachin Kattepura Rajegowda. "Performance Analysis of CLEFIA, PICCOLO, TWINE Lightweight Block Ciphers in IoT Environment." In Proceedings of the International Conference on Security and Management (SAM), The Steering Committee of The World Congress in Computer Science, Computer Engineering and Applied Computing (WorldComp), pp. 25-31. 2017.

[107] Alizadeh, Mojtaba, Mazleena Salleh, Mazdak Zamani, Jafar Shayan, and Sasan Karamizadeh. "Security and performance evaluation of lightweight cryptographic algorithms in RFID." Kos Island, Greece, pp.45-50. (2012).

[108] Çakiroglu, M., 2010. Software implementation and performance comparison of popular block ciphers on 8-bit low-cost microcontroller. Int. J. Phys. Sci, 5(9), pp.1338-1343.2010.

[109] Murvay, Pal-Stefan, et al. "Development of an autosar compliant cryptographic library on state-of-the-art automotive grade controllers." 2016 11th International Conference on Availability, Reliability and Security (ARES). IEEE, 2016.

[110] https://www.microchip.com/mplab/avr-support/atmel-studio-7

[111] Nithya, V., Ramachandran, B. & Bhaskar, V. BER Evaluation of IEEE 802.15.4 Compliant Wireless Sensor Networks Under Various Fading Channels. Wireless Pers Commun 77, 3105–3124 (2014).

[112] Dias GM, Bellalta B, Oechsner S. Reducing the energy consumption in WSNs: A data scientific mechanism. arXiv preprint arXiv:1509.08778. 2015 Sep.

**EKLER**

**EK A.** Tablolar

## EK A

**Tablo A.3.** Hafif siklet şifreler karşılaştırması.

| Algoritma | Blok uzunluğu (Bit) | Anahtar uzunluğu (Bit) | Tekrar sayısı | Yapı | Uygulanan ortam |
|---|---|---|---|---|---|
| AES | 128 | 128, 192, 256 | 10, 12, 14 | SPN | Donanım + Yazılım |
| KLEIN | 64 | 64, 80, 96 | 12, 16, 20 | SPN | Donanım + Yazılım |
| LED | 64 | 64, 128 | 32, 48 | SPN | Donanım + Yazılım |
| SKINNY | 64, 128 | 64, 128, 192<br>128, 256, 384 | 32, 36, 40<br>40, 48, 56 | SPN | Donanım + Yazılım |
| Mysterion | 128, 256 | 128, 256 | 12, 16 | SPN | Donanım + Yazılım |
| RECTANGLE | 64 | 80, 128 | 25 | SPN | Donanım + Yazılım |
| NOEKEON | 128 | 128 | 16 | SPN | Donanım + Yazılım |
| PICO | 64 | 128 | 32 | SPN | Donanım + Yazılım |
| GIFT | 64/128 | 128 | 28,40 | SPN | Donanım + Yazılım |
| QARMA | 64/128 | 128/256 | 16/24 | SPN | Donanım + Yazılım |
| Loong | 64 | 64, 80, 128 | 16, 20, 32 | SPN | Donanım + Yazılım |
| NVLC | 64 | 80, 128 | 20 | SPN | Donanım + Yazılım |
| BORON | 64 | 80, 128 | 25 | SPN | Donanım + Yazılım |
| Midori | 64, 128 | 128 | 16, 20 | SPN | Donanım |
| Zorro | 128 | 128 | 24 | SPN | Donanım |
| Fantomas/Robin | 128 | 128 | 12/16 | SPN | Yazılım |
| PRIDE | 64 | 128 | 20 | SPN | Donanım |
| MANTIS | 64 | 128 | 14 | SPN | Donanım |
| mCrypton | 64 | 64, 96, 128 | 12 | SPN | Donanım |
| PRESENT | 64 | 80, 128 | 31 | SPN | Donanım |
| PRINCE | 64 | 128 | 12 | SPN | Donanım |
| OLBCA | 64 | 80 | 22 | SPN | Donanım |
| KHAZAD | 64 | 128 | 8 | SPN | Donanım |
| PRINTCIPHER | 80/160 | 48/96 | 48/96 | SPN | Donanım |
| SPNRX & LAX | 64<br>128 | 128<br>128, 256 | 24<br>32/40 | SPN<br>(ARX) | Yazılım |
| Chaskey Cipher | 128 | 128 | 8 | ARX | Yazılım |
| SPECK | 32<br>48<br>64<br>96<br>128 | 64<br>72/96<br>96/128<br>96/144<br>128/192/256 | 22<br>22/23<br>26/27<br>28/29<br>32/33/34 | ARX | Yazılım |
| CHAM | 64, 128 | 128, 256 | 16, 32 | ARX | Donanım + Yazılım |
| HIGHT | 64 | 128 | 32 | Feistel<br>(ARX) | Donanım ve Yazılım |

**Tablo A.3. (Devamı)** Hafif siklet şifreler karşılaştırması.

| Algoritma | Blok uzunluğu (Bit) | Anahtar uzunluğu (Bit) | Tekrar sayısı | Yapı | Uygulanan ortam |
|---|---|---|---|---|---|
| RC2 | 64 | 8-1024 | 2, 16 | Feistel | Rc2 (Yazılım), |
| RC5 | 32, 64, 128 | 0…2040 | 12 | ARX | RC5 RC6 (Donanım |
| RC6 | 128 | 128, 192, 256 | 20 | Feistel (II) | veya Yazılım) |
| Cast 5 | 64<br>128, 160, | 40-128 | 12-16 | Feistel | Yazılım |
| Cast 6 | 192, 224, 256 | 128 | 48 | GFN | |
| BRIGHT | 64 | 80, 96, 128 | 32, 33, 34 | GFN | Yazılım |
| | 128 | 128, 192, 256 | 35. 36.37 | | |
| Khudra | 64 | 80 | 18 | GFN | Donanım |
| QTL | 64 | 64, 128 | 25, 31 | GFN | Donanım |
| Piccolo | 64 | 80, 128 | 25, 31 | GFN | Donanım |
| CLEFIA | 128 | 128, 192, 256 | 18, 22, 26 | GFN | Donanım + Yazılım |
| LEA | 128 | 128/192/256 | 24/28/32 | GFN | Donanım + Yazılım |
| TWINE | 64 | 80, 128 | 36 | GFN | Donanım + Yazılım |
| Camellia | 128 | 128, 192, 256 | 24 | Feistel | Donanım + Yazılım |
| SIMECK | 32, 48, 64 | 64, 96, 128 | 32, 36, 44 | Feistel | Donanım + Yazılım |
| LiCi | 64 | 128 | 31 | Feistel | Donanım + Yazılım |
| KASUMI/MIST Y1 | 64 | 128 | 8 | Feistel | Donanım + Yazılım |
| LBlock | 64 | 80 | 32 | Feistel | Donanım + Yazılım |
| SEA | 96 | 96 | 93 | Feistel | Donanım + Yazılım |
| ANU | 64 | 80, 128 | 25 | Feistel | Donanım + Yazılım |
| BlowFish | 64, 128 | Up to 448 | 16 | Feistel | Yazılım |
| Twofish | 128 | 128, 192, 256 | 16 | | |
| Seed | 128 | 128 | 16 | Feistel | Yazılım |
| TEA XTEA | 64 | 128 | 64 | Feistel | Yazılım |
| LILIPUT | 64 | 80 | 30 | Feistel | Yazılım |
| NASE | Değişken | Değişken | Değişken | Feistel | Yazılım |
| ITUBEE | 80 | 80 | 20 | Feistel | Yazılım |
| RoadRunneR | 64 | 80, 128 | 10, 12 | Feistel | Yazılım |
| DES | 64 | 56 | 16 | Feistel | Donanım |
| G-DES | Değişken | Değişken | Değişken (Çift) | | |
| 3DES | 64 | 168, 112, 56 | 48 | | |
| DESL | 64 | 56 | 16 | | |
| DESX | 64 | 184 | 16 | | |
| DESLX | 64 | 184 | 16 | | |
| KAMAR | 128 | 128, 192, 256 | 16, 20, 32 | Feistel | Donanım |

**Tablo A.3. (Devamı)** Hafif siklet şifreler karşılaştırması.

| Algoritma | Blok uzunluğu (Bit) | Anahtar uzunluğu (Bit) | Tekrar sayısı | Yapı | Uygulanan ortam |
|---|---|---|---|---|---|
| Skipjack | 64 | 80 | 32 | Feistel | Donanım |
| HISEC | 64 | 80 | 15 | Feistel | Donanım |
| GOST | 64 | 256 | 32 | Feistel | Donanım |
| DLBCA | 32 | 80 | 15 | Feistel | Donanım |
| SIMON | 32 | 64 | 32 | Feistel | Donanım |
| | 48 | 72/96 | 36 | | |
| | 64 | 96/128 | 42/44 | | |
| | 96 | 96/144 | 52/54 | | |
| | 128 | 128/192/256 | 68/69/72 | | |
| SFN | 64 | 96 | 32 | Feistel + SPN | Donanım + Yazılım |
| SIT | 64 | 64 | 5 | Feistel + SPN | Donanım + Yazılım |
| Iceberg | 64 | 128 | 16 | Devrimsel mimari | Donanım |
| PUFFIN | 64 | 128 | 32 | Devrimsel SPN | Donanım |
| PUFFIN2 | | 80 | 34 | | |
| FeW | 64 | 80/128 | 32 | Balanced GFN + SPN | Yazılım |
| $\mu^2$ | 64 | 80 | 15 | GFN + SPN | Donanım + Yazılım |
| LRBC | 16 | 16 | 24 | Feistel + SPN | Donanım |
| FLY | 64 | 128 | 20 | Bitsliced şifre | Donanım + Yazılım |
| KATAN/KTANTAN | 32, 48, 64 | 80 | 254 | Bivium | Donanım |
| TREYFER | 64 | 64 | 32 | Basit | Donanım |
| BKSQ | 96, 144, 192 | 96 | 10, 14, 18 | SQUARE şifre | Donanım |

## ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Uras PANAHI

## ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans :** 2005, SHIRAZ Shahid Bahonar No.1 Teknik Koleji (İran), Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans :** 2008, İslam Azad Üniversitesi (İran), IT ve Bilgisayar Mühendisliği, IT Mühendisliği (Bilgisayar Ağlarında Uzman)

## MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2017-2021 yılları arasında Bolu Abant İzzet Baysal Üniversitesinde, Bilgisayar Mühendislik Bölümünde, tam zamanlı öğretim görevlisi.
- 2011- 2016 yılları Ankara Üniversitesi, Bilgisayar Mühendislik Bölümünde, tam zamanlı öğretim görevlisi.

## TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Uras Panahi, Cüneyt Bayılmış, "Enabling secure data transmission for wireless sensor networks based IoT applications", Ain Shams Engineering Journal, Volume 14, Issue 2, 2023, 101866, ISSN 2090-4479, https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101866, SCIE, Q1. (SCIE Dergi Örneği)
- Panahi, P., Bayılmış, C., Çavuşoğlu, U. et al. "Performance Evaluation of Lightweight Encryption Algorithms for IoT-Based Applications", Arabian Journal for Science and Engineering, 46, 4015–4037 (2021), Springer. https://doi.org/10.1007/s13369-021-05358-4, SCIE, Q2. (SCIE Dergi Örneği)
- Pejman Panahi, Cüneyt Bayılmış, Unal Çavuşoğlu, Sezgin Kaçar, "Comparing PRESENT and LBlock block ciphers over IoT Platform", 12th International Conference on Information Security and Cryptology (ISC 2019), 16-17 Oct, pp:66-69. (Konferans Makale Örneği)
- Pejman Panahi, Cüneyt Bayılmış, Unal Çavuşoğlu, Sezgin Kaçar, "Performance Evaluation of L-Block Algorithm for IoT Applications", 3rd International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK 2018), 20-23 Sept 2018, Bosnia & Herzegovina, Sarajevo, pp: 609-612. (Konferans Makale Örneği)

**DİĞER ESERLER (Makale, bildiri):**

1- Baki Koyuncu, Pejman Panahi, Sefika Varlioglu, "*Comparative Indoor Localization by using Landmarc and Cricket systems*"**,** International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, ISSN 2250–2459, ISO 9001:2008, certified Journal, volume 5, issue 6, June 2015, pages: 453-456.

2- Baki Koyuncu, Erkan Meral and Pejman Panahi, "*Real time Geolocation tracking by using GPS+GPRS and Arduino based SIM908*"**,** IFRSA INTERNATIONAL JOURNAL OF ELECTRONICS CIRCUITS AND SYSTEMS (IIJECS), vol 4, issue 2, July 2015, pages: 148-150.

3- Baki Koyuncu and Pejman Panahi, *"Kalman Filtering of Link Quality Indicator Values for Position Detection by Using WSNS",* International Journal of Computing, Communications & Instrumentation Eng. (IJCCIE) vol. 1, issue 1 (2014), ISSN 2349-1469 EISSN 2349-1477, pages: 129-133.

4- Baki Koyuncu, B.Uğur, Pejman Panahi, "*Indoor Location Determination by Using RFIDs",* International Journal of Mobile and Adhoc Network (*IJMAN*), vol 3, issue 1, Feb 2013, pages: 7-11.

5- Pejman Panahi, Michelle Freund, "*Safety Application Schema for Vehicular Virtual Ad Hoc Grid Networks*", International Journal of Academic Research (IJAR), vol 3, no 2, March 2011, pages: 26-29.

6- Pejman Panahi, "*The Feedback Based Mechanism for Video Streaming Over Multipath Ad Hoc Networks*", Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran; ISSN: 1016-1104, May 2010, pages: 169-179.

7- Pejman Panahi, Cüneyt Bayılmış, "*Car Indoor GAS Detection System*", 2nd International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK 2017), 5-8 October 2017, Antalya, Turkey, IEEE indexed, pp: 957-960.

8- Baki Koyuncu, Alper Gokce and Pejman Panahi, "*Introduction of the Unity Game Engine in Reconstruction of an Archeological Site*", 19th Symposium on Mediterranean Archaeology, 12-14 November 2015 – Kemer, Turkey, pp: 95-103.

9- Baki Koyuncu, Alper Gokce and Pejman Panahi, "*Reconstruction of an Archeological site in real time domain by using software techniques*", The Fifth International Conference on Communication Systems and Network Technologies (CSNT-2015), 04-06 April 2015, Gwalior, India, IEEE Proceedings, pp: 1350-1354.

10- Pejman Panahi, F.Borna, "*Distance Learning, Challenges, New Solution*", 37th International Convention on Information and Communication Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO 2014), 26-30 May 2014, Opatija, Croatia, IEEE Proceedings, pp: 771-774.

11- Pejman Panahi, "*Providing Consistent Global Sharing Service Over VANET Using New Plan*", CSICC 2009, 14th annual International CSI Computer Conference, 20-21 October 2009, Tehran, Iran, IEEE Proceedings, pp: 213-218.

12- Pejman Panahi, "*New Plan for Hardware Resource Utilization in Multimedia Applications Over Multi Processor Based System*", 32nd International Convention MIPRO 2009**,** Conference on GRID AND VISUALIZATION SYSTEMS (GVS), 25-29 May 2009, Opatija, Croatia**,** pp: 256-260.

13- Pejman Panahi, "*Multipath Local Error Management Technique Over Ad Hoc Networks*", AXMEDIS 2008, 4th International Conference on Automated Production of Cross Media Content for Multi-Channel Distribution, 17-19 November 2008, Florence, Italy, IEEE Proceedings, pp:187-194.

14- Pejman Panahi, H. K. Maragheh, M. Abdolzadeh and M. Sharifi, "A Novel Schema for Multipath Video Transferring over Ad Hoc Networks," 2008 The Second International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies, Valencia, 2008, pp. 77-82, doi: 10.1109/UBICOMM.2008.60.

15- Pejman Panahi, Mehdi Dehghan, "*Multipath Video Transmission over Ad hoc Networks using Layer Coding and Video Caches*", ICEE2008, 16th Conference on Electrical Engineering, 13th – 17th May 2008, pp: 50-55.