



**T.C.  
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**NESNELERİN İNTERNETİYLE KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA  
ORTAM ERİŞİM TEKNİĞİ GELİŞTİRİLMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

Sami AÇIK

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

**ARALIK 2022**

T.C.  
BURSA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

NESNELERİN İNTERNETİYLE KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA  
ORTAM ERİŞİM TEKNİĞİ GELİŞTİRİLMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Sami AÇIK  
(20278034078)

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Mehmet Barış TABAKCIOĞLU

Eş Danışman: Doç. Dr. Selahattin KOŞUNALP

ARALIK 2022



BTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 20278034078 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi Sami AÇIK, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “NESNELERİN İNTERNETİYLE KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA ORTAM ERİŞİM TEKNİĞİ GELİŞTİRİLMESİ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** **Doç. Dr. Mehmet Barış TABAKCIOĞLU**  
Bursa Teknik Üniversitesi .....

**Eş Danışman :** **Doç. Dr. Selahattin KOŞUNALP**  
Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi .....

**Jüri Üyeleri :** **Dr. Öğr. Üyesi Ömer ASLAN**  
Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi .....

**Dr. Öğr. Üyesi Ömer ZOR**  
Bursa Teknik Üniversitesi .....

**Teslim Tarihi :**  
**Savunma Tarihi : 26 Aralık 2022**



20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Bursa Teknik Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, Bursa Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğünün 210Y013 numaralı projesi ile desteklenmiştir.

## İNTİHAL BEYANI

Bu tezde görsel, işitsel ve yazılı biçimde sunulan tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uyularak tarafımdan elde edildiğini, tez içinde yer alan ancak bu çalışmaya özgü olmayan tüm sonuç ve bilgileri tezde kaynak göstererek belgelediğimi, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim.

Öğrencinin Adı Soyadı: Sami AÇIK

İmzası :

X X X X X



*Aileme,*

## ÖNSÖZ

Bu tezi hazırlarken geçirdiğim süreçte bana her türlü desteği veren Doç. Dr. Mehmet Barış TABAKCIOĞLU ve Doç. Dr. Selahattin KOŞUNALP olmak üzere Bursa Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümündeki tüm hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca çalışmalarımnda bana maddi ve manevi desteğini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

Aralık 2022

Sami AÇIK



# İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	vii
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	viii
<b>KISALTMALAR</b> .....	x
<b>SEMBOLLER</b> .....	xii
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	xiii
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	xiv
<b>ÖZET</b> .....	xv
<b>SUMMARY</b> .....	xvi
<b>1. GİRİŞ</b> .....	1
<b>2. KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR</b> .....	3
2.1 Uygulama Alanları .....	4
2.2 Algılayıcı Düğüm Yapısı .....	5
2.3 Algılayıcı Ağların Haberleşme Mimarisi .....	6
2.4 Çoklu Erişim Teknikleri .....	9
2.4.1 Frekans bölmeli çoklu erişim (FDMA) .....	9
2.4.2 Zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA) .....	9
2.4.3 Kod bölmeli çoklu erişim (CDMA) .....	10
2.4.4 Rastgele çoklu erişim .....	10
2.5 MAC Protokolleri .....	11
2.5.1 Çekişme tabanlı MAC protokolleri .....	11
2.5.1.1 Taşıyıcı algılama çoklu erişim (CSMA) .....	11
2.5.1.2 Sensor MAC (S-MAC) .....	11
2.5.1.3 Zaman aşımı MAC (T-MAC) .....	12
2.5.1.4 Berkeley medya erişim protokolü (B-MAC) .....	13
2.5.1.5 Alıcı tarafından başlatılan MAC (RI-MAC) .....	13
2.5.1.6 Öngörülü uyandırma MAC (PW-MAC) .....	14
2.5.2 Program tabanlı MAC protokolleri .....	15
2.5.2.1 Düşük enerji uyumlu kümeleme hiyerarşisi (LEACH) .....	15
2.5.2.2 Trafığe uyarlanabilir ortam erişim protokolü (TRAMA) .....	15
2.5.2.3 Öncelik tabanlı MAC (PRIMA) .....	16
2.5.3 Hibrit MAC protokolleri .....	17
2.5.3.1 Zebra MAC (Z-MAC) .....	17
2.5.3.2 Y-MAC .....	17
2.5.3.3 CSMA/TDMA hibrit .....	18
2.5.4 RL tabanlı MAC protokolleri .....	18
2.5.4.1 RL-MAC .....	18
2.5.4.2 ALOHA-Q .....	19
2.5.4.3 RL-ALOHA-IR .....	20
2.5.4.4 QL-MAC .....	20
2.6 Çok Ortam Enerjisi Kaynakları .....	20
2.6.1 RF enerji hasadı .....	21
2.6.2 Piezoelektrik etki .....	23
2.6.3 Termal enerji .....	23
2.6.4 Güneş enerjisi .....	23
<b>3. SİSTEM MODELLERİNİN TANIMI</b> .....	<b>25</b>
3.1 ALOHA Protokol Temelleri .....	25

3.2 Q-Öğrenme Temelleri .....	29
3.3 Geliştirilen Algılayıcı Düğüm .....	31
3.4 Tek-Atlamalı Senaryo Tasarımı .....	32
3.5 Yakalama Etkisi Temelleri .....	33
3.6 ALOHA ve Yakalama Etkisi .....	35
3.7 ALOHA ve Dinamik Veri Uzunluğu .....	37
3.8 IoT ve Q-öğrenme ile ALOHA .....	38
<b>4. PERFORMANS ANALİZİ .....</b>	<b>40</b>
4.1 ALOHA Kanal Performans Analizi .....	40
4.2 Farklı İletim Güçleri için Kanal Performansı .....	41
4.3 ALOHA ve Dinamik Veri Uzunluğu .....	42
4.4 Onay Mesajı ile ALOHA Kanal Performansı .....	43
4.5 Q-Öğrenme Tabanlı ALOHA Kanal Performansı .....	44
4.6 Güneş Enerjisi ile Bataryanın Şarj Edilip Paket İletimi Gerçekleştirilmesi.....	45
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>47</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>52</b>



## KISALTMALAR

<b>ACK</b>	: Acknowledge
<b>AD</b>	: Algılayıcı Düğüm
<b>ALOHA-C</b>	: ALOHA with capture
<b>B-MAC</b>	: Berkeley Media Access Protocol
<b>CDMA</b>	: Code Division Multiple Access
<b>CRC</b>	: Cyclic Redundancy Check
<b>CSMA</b>	: Carrier Sense Multiple Access
<b>CSMA/CA</b>	: Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance
<b>CSMA/CD</b>	: Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection
<b>EH</b>	: Energy Harvesting
<b>FDMA</b>	: Frequency Division Multiple Access
<b>GHz</b>	: Gigahertz
<b>GPS</b>	: Global Positioning System
<b>IOT</b>	: Internet of Things
<b>ISM</b>	: Industrial Scientific Medical
<b>KAA</b>	: Kablosuz Algılayıcı Ağ
<b>LCL</b>	: Low Contention Level
<b>LEACH</b>	: The Traffic-Adaptive Medium Access Protocol
<b>MAC</b>	: Medium Access Control
<b>MANET</b>	: Mobil Geçici Ağ
<b>MDP</b>	: Markov Decision Process
<b>OSI</b>	: Open System Interconnection
<b>P-ALOHA</b>	: Practical ALOHA
<b>PRIMA</b>	: Priority-Based MAC
<b>PW-MAC</b>	: Predictive-Wakeup MAC
<b>QoS</b>	: Quality of Service
<b>RF</b>	: Radyo Frekansı
<b>RFID</b>	: Radio Frequency Identification
<b>RI-MAC</b>	: Receiver-Initiated MAC
<b>RL</b>	: Reinforcement Learning
<b>SINR</b>	: Signal-to-Interference-Plus-Noise-Ratio
<b>S-MAC</b>	: Sensor MAC
<b>SMP</b>	: Symmetric MultiProcessing

## KISALTMALAR

<b>SQDDP</b>	: Algılayıcı Sorgu ve Veri Yayma Protokolü
<b>SYNC</b>	: Synchronization
<b>TADAP</b>	: Veri Duyurma Protokolü
<b>TCP</b>	: Transmission Control Protocol
<b>TDMA</b>	: Time Division Multiple Access
<b>T-MAC</b>	: Timeout MAC
<b>TRAMA</b>	: Algılayıcı Düğüm
<b>UDP</b>	: User Datagram Protocol
<b>WPNs</b>	: Wireless Personal Networks
<b>Z-MAC</b>	: Zebra MAC

## SEMBOLLER

<b>A</b>	: Durumlar Kümesi
<b>C</b>	: Sıcaklık
<b>G</b>	: Kanal Trafiği
<b>Hz</b>	: Frekans
<b>r<sub>t</sub></b>	: Verilen Ödül
<b>s</b>	: Eylemler Kümesi
<b>T</b>	: Verim
<b>t</b>	: Zaman
<b>V</b>	: Gerilim
<b>W</b>	: Güç
<b><math>\alpha</math></b>	: Öğrenme Oranı
<b><math>\Upsilon</math></b>	: Azaltma Faktörü
<b><math>\Omega</math></b>	: Direnç

## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

- Çizelge 4.1** : Practical ALOHA'da MAX iletme gücüne göre kanal performansı... **42**  
**Çizelge 4.2** : Practical ALOHA'da Dynmic Payload ile kanal performansı ..... **42**



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : (a) Ortam enerjili algılayıcı düğüm (b) Geleneksel algılayıcı düğüm.....	5
Şekil 2.2 : Algılayıcı düğümlerin bölgeye yayılma ve haberleşmesi .....	6
Şekil 2.3 : Algılayıcı ağlardaki haberleşme katmanları ve düzlemleri.....	7
Şekil 3.1 : ALOHA paket iletimi.....	26
Şekil 3.2 : ALOHA ve Dilimli ALOHA'nın Teorik Verimi .....	27
Şekil 3.3 : ALOHA'da akış diagramı .....	28
Şekil 3.4 : Dilimli ALOHA'da veri gönderimi.....	29
Şekil 3.5 : Sensör düğümünün tüm bileşenleri .....	31
Şekil 3.6 : Tam paket formatı .....	32
Şekil 3.7 : Altı verici ve bir alıcıda oluşan tek atlamalı topoloji .....	33
Şekil 3.8 : Bazı paket çarpışma örnekleri .....	34
Şekil 3.9 : Genel yakalama durumları .....	35
Şekil 3.10 : 2 paket yakalama senaryosunun bir örneği. ....	36
Şekil 3.11: Paket çarpışması örneği: (a) Sabit yük boyutu ile ve (b) Değişken yük boyutu ile.....	37
Şekil 4.1 : ALOHA, ALOHA with capture ve Practical ALOHA verim grafiği .....	40
Şekil 4.2 : ALOHA, ALOHA with capture ve Practical ALOHA'nın ACK alınarak verim grafiği .....	43
Şekil 4.3 : Practical ALOHA ve Practical ALOHA with Dynamic Payload gecikme performansı .....	44
Şekil 4.4 : IoT-ALOHA'nın Kanal Performansı .....	45
Şekil 4.5 : IoT-ALOHA'nın gecikme performansı .....	45
Şekil 4.6 : Bataryaya güneş panelinden alınan enerji verim değişimi.....	46

## NESNELERİN İNTERNETİYLE KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA ORTAM ERİŞİM TEKNİĞİ GELİŞTİRİLMESİ

### ÖZET

Kablosuz Algılayıcı Ağların (KAA) kanal verimi, gecikme süresi gibi birçok performansın optimum seviyeye taşınması için akıllı ortam erişim protokolleri (MAC) geliştirilmiştir. İlk geliştirilmiş MAC protokollerinden olan ve karmaşık algoritmalarından uzak ALOHA protokolü daha sonra ortaya çıkan birçok protokole öncülük yapmıştır. Tez çalışmamızda, KAA için en önemli parametrelerden olan kanal veriminin ve gecikme performansının daha iyi bir seviyeye taşınması için ALOHA protokolünün tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Hayati önem taşıyan enerji ve gecikme durumu iyileştirilirken paket çarpışmasının asgari düzeye düşürülmesi ana hedeflerdendir. Yapılan ilk çalışmada ALOHA protokolünün matematiksel modelinin kanal verim performansı ile pratik ALOHA'nın kanal verim performansının kıyaslaması yapılmıştır. İkinci uygulamamızda ise 6 vericiden oluşan ağımızı sırasıyla her bir vericinin iletim gücü artırılarak performans sonuçları sunulmuştur. Daha sonra verici tarafından iletilen paketin sabit olması yerine paketin değişimine olanak sağlayan dinamik yük ile paket iletimi gerçekleştirilmiştir. Trafik yükü 1 Erlang ve dinamik yük uzunluğu 15-32 bayt olarak ayarlandığında kanal verimi 0.47 gibi başarılı bir sonuç elde edilmiştir. Yapılan ilk uygulamada ALOHA protokolünün, verici tarafından iletilen paketin alıcı tarafından başarılı bir şekilde alındığını teyit eden kısa paket onay mesajı (ACK) olmadan kanal verimi ve gecikme performansı hesaplanırken daha sonra ACK onay mesajı ile performans değerlendirmesi yapılmıştır. KAA'da sınırlı kapasiteye sahip bataryanın değişiminin pek mümkün olmayan bölgelere yerleştirilmesinden kaynaklı problemi çözmek için çeşitli ortam enerjilerinden olan güneş enerjisini güneş paneli kullanarak bataryaya sürekli enerji desteği sağlanmış olundu. Böylece paket iletim süresi ortam enerjisi olmadığı duruma göre çok daha uzun sürdüğü görülmüştür. Güneş paneli kullanılarak paket iletim süresi uzatılmıştır. Tez çalışmanın diğer bir katkısı da nesnenin internetinin (IoT) ALOHA protokolüne uygulanıp gecikme ve kanal verimi gibi parametrelerin optimum düzeye taşınması sağlanmıştır. Amaçlanan iyileştirmenin sağlanması için Q-öğrenme politikası kullanılmıştır. Yapılan çalışma sonunda, tek atlamalı ALOHA protokolünün kanal verimi yaklaşık %18 gibi düşük bir değere sahip iken geliştirilen yaklaşım ile yaklaşık olarak %58 gibi yüksek kanal verimi elde edilmiştir.

**Anahtar kelimeler:** ALOHA, Ortam Erişim Kontrolü, Nesnelerin İnterneti, Q-öğrenme, Dinamik Yük, Kablosuz Algılayıcı Ağlar.

# DEVELOPING MEDIA ACCESS TECHNIQUE IN WIRELESS SENSOR NETWORKS WITH THE INTERNET OF THINGS

## SUMMARY

Intelligent medium access protocols (MAC) have been developed to optimize the performance of wireless sensor networks (WSN) such as channel efficiency and latency. ALOHA, as the first MAC approach, inspired the development of several MAC schemes in network domain with primary advantage of simplicity. In this thesis, we present design, implementation, and performance evaluations of ALOHA approach through significant improvements to attain high channel utilization as the most important performance metric. A critical emphasis is currently focused on removing the burden of packet collisions while satisfying requirements of energy and delay criterions. We first implement ALOHA protocol to practically explore its performance behaviors in comparison to analytical models. Then, the transmission power of nodes is systematically increased to observe the performance metrics. We then introduce the concept of dynamic payload instead of fixed-length packets, whereby a dynamic selection of length of each transmitted packet is employed. A throughput performance of 0.47 is achieved when the payload length is ranged from 15 to 32 bytes. One of the main concerns to begin the practical implementations as an underlying contribution of this thesis is to observe the throughput performance of ALOHA without acknowledgement (ACK) mechanism. In this scenario, all generated packets are transmitted once without ACK and retransmission policy. Later, a critical part of the performance evaluations is dedicated to the throughput and delay performances of ALOHA under the presence of ACK mechanism. To solve the problem arising from the placement of the battery with limited capacity in the WSNs, continuous energy support was provided to the battery by using solar energy, which is one of the various ambient energies. Another specific contribution of this paper is to integrate the transmission policy of ALOHA with the potential of Internet of Things (IoT) opportunities. The proposed policy utilizes a state-less Q-learning strategy to achieve the maximum performance efficiency. Performance outputs prove that the proposed idea ensures a maximum throughput of approximately 58% while ALOHA is limited to nearly 18% over a single-hop scenario.

**Keywords:** ALOHA, Medium Access Control, Internet of Things, Q-learning, Dynamic Payload, Wireless Sensor Networks.

## 1. GİRİŞ

Kablosuz Algılayıcı Ağlar (KAA), çağımızın gelişen şartlarında askeri, endüstri, sağlık, nesnelerin interneti (IOT), çevre şartlarında haberdar olma gibi bir çok kullanım sahasına sahiptir. Algılayıcı Düğümler (AD) çevre şartlarında algılanması gereken sıcaklık, nem, ısı, basınç gibi bilgileri daha uygun ve sağlıklı bir şekilde iletimi gerçekleştirdiği için gün geçtikçe daha da popüler hale gelmektedir [1]. AD modülü geleneksel algılayıcı düğüm ve ortam enerjili algılayıcı düğüm olarak ikiye ayırabiliriz. Geleneksel algılayıcı düğümde; algılayıcı, işlemci, anten ve batarya bulunmaktadır. Ortam enerjili algılayıcı düğümde ise geleneksel algılayıcı düğümden farklı olarak batarya yerine ortam enerji üreticisi ve enerji depolama ünitesi yer almaktadır. KAA bir çok AD'nin koordineli bir şekilde çalışmasıyla faaliyet göstermektedir [2]. KAA'nın sağladığı birçok avantaj da popüleritesini gün geçtikçe artırmaktadır. Bu avantajlar; yapımı için yapılan harcamanın uygun bütçe ile gerçekleştirilmesi, enerjinin asgari seviyede harcanması, bilgi işleme, haberleşmenin kablosuz olarak gerçekleşmesi, az sayıda donanıma ihtiyaç duyulması ve küçük boyutta olmasıdır. Özellikle haberleşmenin kablosuz olarak gerçekleşmesi kablonun zarar görme durumu, yüksek kablo masrafı, yüksek enerji harcanması ve yoğun kablo karmaşası gibi birçok sorunu oradan kaldırmaktadır [3].

KAA'ların konumu, düğümlerin rastgele dağıtılmasından veya insanların ulaşımı için çok uygun olmayan yerler olmasından dolayı batarya değişimine imkan vermiyor. KAA'da enerji depolama ihtiyacını sınırlı kapasiteye sahip pil veya süper kondansatör karşılamaktadır. Enerjisi biten AD artık üzerine düşen vazifeyi yapamayacak ve ömrü bitmiş olacaktır. Ortaya çıkan bu problemi çözmek için enerji kullanımının optimum düzeyde tutulması gerekmektedir. KAA'da enerji; algılama, hesaplama ve veri iletimi yapılırken harcanmaktadır. Ortam erişim kontrolü protokolleri (MAC) enerji tüketimini azaltmak için ve veri iletimini daha verimli bir şekilde gerçekleştirmek için geliştirilmektedir. MAC protokolüyle verici, algıladığı veriyi birçok durumu göz önünde bulundurarak alıcıya iletmesi gerekmektedir. Öncelikle verinin iletilmesi batarya israfına yol açmaması gerekir.

Bataryanın verimli bir şekilde kullanılması verinin nasıl, ne zaman, hangi boyutta, hangi hızda gönderileceği belirleyici etmenlerdir. Örneğin gönderilen verinin boyutu aynı anda alıcıya gönderilen paketlerin çarpışma ihtimalini değiştirmektedir. Paket boyutu artıkça çarpışma ihtimali de artar. Çarpışma olması durumunda her iki paket de alıcıya iletilmez. Bu durum vericilerin aynı paketi tekrar alıcıya ilemesine sebep olmaktadır. Tekrar gönderilen paket bataryadan ekstra enerji tüketimine sebep olmaktadır. Ortaya çıkan ekstra enerji tüketimini azaltmak için vericinin talep edilen paketi uygun boyutta göndermesi gerekmektedir. Kullanılan protokoller sayesinde veri ve batarya yönetimi optimum düzeyde tutulmaktadır. Ancak batarya kapasitesinin sınırlı olmasından dolayı belli bir zaman sonra enerji bitecektir. AD'nin bulunduğu konum itibarıyla bataryasının değişimi mümkün olmadığı için bataryada yeterli seviyede enerji bulunmadığı vakit AD'nin haberleşmesini de imkansız kılmaktadır. Bundan dolayı enerjiyi optimum düzeyde kullanmakla beraber dışardan AD'ye enerji sağlanmalıdır. Böylece algılayıcı düğümlerin sürekli aktif bir şekilde faaliyet göstermesine olanak sağlanmış olmaktadır. Güneş, rüzgar ve termal gibi ortam enerjileri AD'nin ortaya çıkan ihtiyacını karşılamak için kullanılmaktadır [4]. Ortam enerji kaynağının kullanıldığı ağın mimarisine ek olarak ortam enerji üretici yer alır. Ortamdaki enerjinin AD'nin ihtiyacını karşılayabilmesi için elektrik enerjisine çevrilmesi gerekmektedir. Bununla beraber ortamdaki hasat edilen enerjinin depolanması için depolama ünitesi bulunmaktadır. Herhangi bir haberleşme gerçekleşeceği zaman AD ortamdaki hasat edilen enerjinin depolandığı birimden gerekli enerjiyi almaktadır. Dönüştürülen enerji süper-kondansatörde depolanır. Depolama ünitesi için süper-kondansatörün kullanılmasının sebebi şarj edilirken sağladığı avantaj ve depolanan gücün yoğun olmasıdır [5].

AD'nin sınırlı kapasiteye sahip bataryasının enerji ihtiyacı güneş paneli kullanılarak giderilebilmektedir. Veri iletimi esnasında kanal verimi ve gecikme performansı aşılması gereken problemlerdendir. Yeni geliştirilen MAC yaklaşımı ALOHA tabanlı olup öncelikle bu protokolün uygulaması yapılmıştır. Daha sonra, farklı senaryolar kurulup nesnelere interneti ve enerji hasadı ile bu protokol tabanlı geliştirilmiş bir MAC yaklaşımı elde edilmiştir. Özellikle gecikme performansı ön planda tutulmuştur. Sonuç olarak, bu tez sonunda zaman açısından kritik kablosuz algılayıcı ağlar için yeni bir yaklaşım ortaya konulmuştur.

## 2. KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLAR

Kablosuz algılayıcı ağlar; nem, sıcaklık, ısı, basınç, hareket, titreşim gibi çevresel değişim ve insan sağlığı için hayati önem taşıyan kan basıncı, kalp atışı, stres gibi değerleri algılamaktadır. Anlaşılacağı üzere algılayıcıların askeri, çevresel, sağlık, tıbbi sistemler, ev, uzay keşfi, kimyasal işleme ve afet kurtarma gibi birçok alanda kullanım fırsatı bulmaktadır. Hata payının düşük olması, düşük bütçe ile gerçekleştirilmesi, algılamanın kuvvetli oluşu, yayılmanın kısa sürede gerçekleşmesi gibi özellikler algılayıcıların bu kadar geniş alanda kullanılmasının önünü açmaktadır. Algılanan bu verilerin işe yarar bir bilgi haline getirilmesi için verinin işlenmesi ve merkezi bir yere taşınması gerekmektedir. Bu işlemleri gerçekleştirmek KAA'ların varlığıyla çözümlenir. KAA birçok algılayıcının birden fazla yere yerleştirilmesiyle ortaya çıkar [1].

Verinin daha sağlıklı ve güvenilir olması için bölgenin sürekli izlenmesi gerekir. Ayrıca bilginin alınmak istendiği mekan genellikle ulaşılması zor olması gibi nedenlerden dolayı KAA'ların kullanım ihtiyacını artırmıştır. KAA'ların bu pratik ve kullanım rahatlığı popülaritesini arttırdığı gibi aynı zamanda AD'nin batarya takibini ve batarya değişimini problem haline getirmiştir. Ortaya çıkan bu dezavantajın minimum seviyeye indirilmesi için birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmalardan birincisi, veri iletimini ihtiyaç nispetinde daha verimli şekilde göndermektir. Böylece kanal verimi artmış olur ve batarya tüketimi daha az gerçekleşmiş olur. Bu yaklaşımlar için birçok MAC protokolü geliştirilmiştir. Ancak batarya kapasitesinin sınırlı olmasından dolayı en nihayetinde batarya bitecektir. Bataryanın bitmesi AD'nin artık kullanılamaz hale gelmesi demektir. MAC protokollerinin geliştirilmesine rağmen devam eden bu problemi çözmek için ikinci yol olarak ortam enerjisini (EH) alıp bataryanın ihtiyacını karşılamak önerilmiştir. Teorikte ortamın sınırsız enerjisinin olması batarya ömrünün sonsuz olması demektir [4].

Bu kısımda KAA'ların uygulama alanları, AD yapısı, algılayıcı ağların haberleşme yapısı, MAC protokolleri anlatılmıştır.

## 2.1 Uygulama Alanları

KAA'ların kullanım yelpazesi yukarıda bahsedildiği sebeplerden dolayı oldukça geniştir. Sağlık uygulamalarında hastanın vücuduna yerleştirilen algılayıcı sayesinde hastanın kalp, stres, kan gibi değerlerin takibi, hastalığın tespiti, hastanın psikolojik durumunu izleme, engelliler için arayüz sağlama gibi kullanıldığı birçok alanı sıralayabiliriz [1,6].

Evde kullanım alanları ise çamaşır makinesi, bulaşık makinesi, fırın, klima gibi elektronik cihazların kontrol edilip ihtiyacı karşılayacak pozisyona getirilmesi kapalı ortamda AD tarafında gerçekleşmektedir. Dışarda ise internet yada uydu vesilesiyle bu aletlerin kullanımını ev sahibinin arzu ettiği şekilde gerçekleştirir [1].

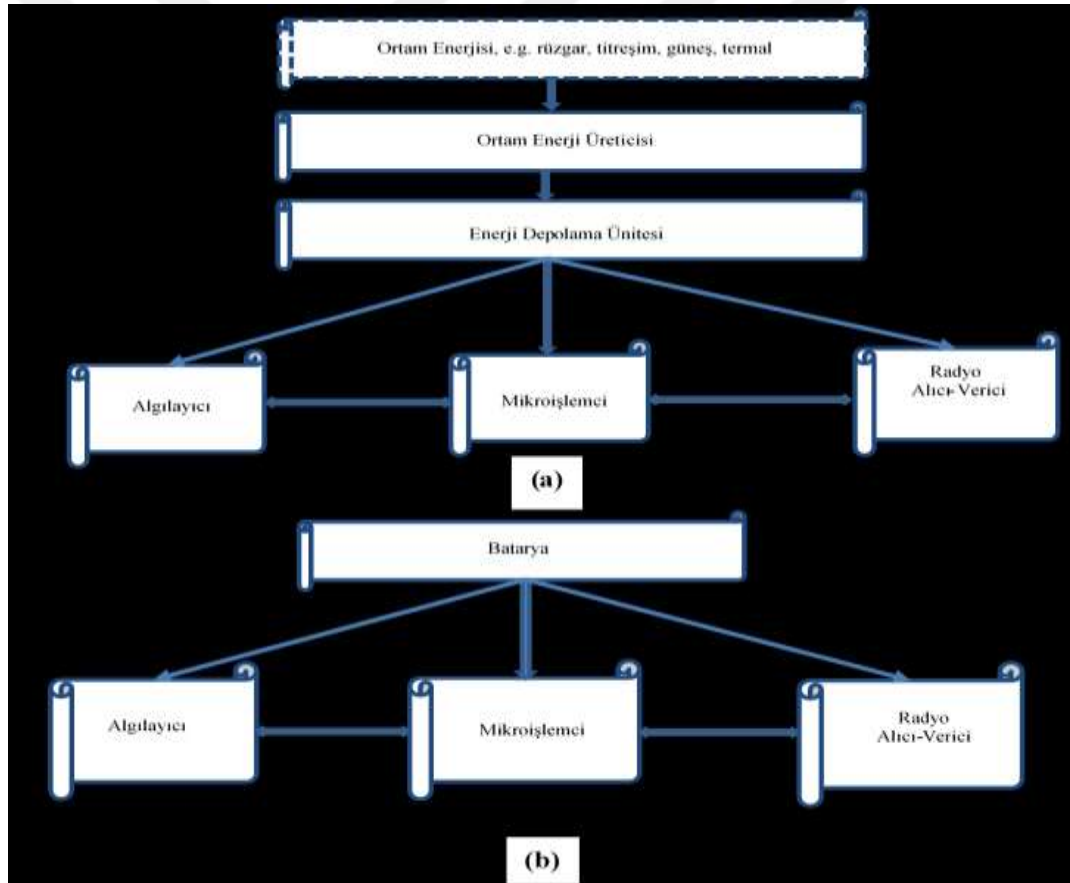
Dış dünyada gözlemlemek istediğimiz değişim, dönüşüm, yıkım gibi birçok parametrenin varlığı çevresel uygulamalarda KAA'ların kullanım yelpazesinin genişliğini bize göstermektedir. Tarım ürünlerinin ortamda zarar görmesine sebep olan kimyasal ve biyolojik problemleri algılamak, hassas tarım, çevrede izlenmesi gereken canlıların hareket takibi, sel felaketi, orman yangını, havadaki zararlı gazların tespiti, jeofizik çalışmalarda arazideki koşulların tespiti gibi KAA'ların daha ifade etmediğimiz yüzlerce kullanım sahası vardır [1,7].

Her zaman insan müdahalesinin mümkün olmadığı, uzaktan takip edilmesi gereken, daha az risk ve zayıyla vazifenin başarılı bir şekilde tamamlanması istenen uygulamalardan bir tanesi de askeriyedir. Savaş bölgesini izleme, düşman konumunu belirleme, savaşta ortaya çıkan zayıyatı belirleme, nükleer, kimyasal ve biyolojik saldırının algılanması, istihbari bilginin hızlı bir şekilde merkeze iletilmesi gibi durumlarda KAA olumsuz şartlara rağmen pratik ve az maliyetle görevi başarılı bir şekilde gerçekleştirdiği söylenebilmektedir [1].

KAA'ların kullanımının geniş olduğu bir başka alan ise ticaridir. Ürün takibi, kalite kontrol, fabrika süreç kontrol, fabrikada kullanılan elektronik cihazda meydana gelen hasar tespiti, hırsızlık meydana geldiğinde kullanıcıyı haberdar eden alarm sistemi, IoT uygulamalarında, interaktif müzelerde, fabrikalarda seri üretim gerçekleşirken kullanılan robotların idaresi ve kontrol edilmesinde, meydana gelen felakette istenilen verinin alınmasında kullanılmaktadır [1,8].

## 2.2 Algılayıcı Dügüm Yapısı

AD'ler 4 temel bölümden teşkil edilmektedir. Ancak ihtiyaç nispetinde bu ana bölümlere ekipmanlar eklenir. Birinci bölümde algılama işlemi yapan sensör ve algılanan verinin kullanıcı tarafında anlaşılır hale getiren analog/digital dönüştürücü bulunmaktadır. İkinci kısımda ise AD'lerin birbirleriyle nasıl koordineli bir şekilde çalışacaklarını ve veri iletim protokolünün hangi aralıkta gerçekleşeceğini ayarlayan işlemci bulunmaktadır. Üçüncü bölümde ise AD'lerin birbirleriyle iletişimini gerçekleştiren anten bulunmaktadır. AD'lerin temel kısımlarını teşkil eden son birim ise enerji depolama işlemini gerçekleştiren bataryadır. Bu temel birimlerin dışında ihtiyaç nispetinde Küresel Konum Bulma Sistemi (GPS), enerji kaynağı gibi ekipmanlar ilave edilebilir [1,2].



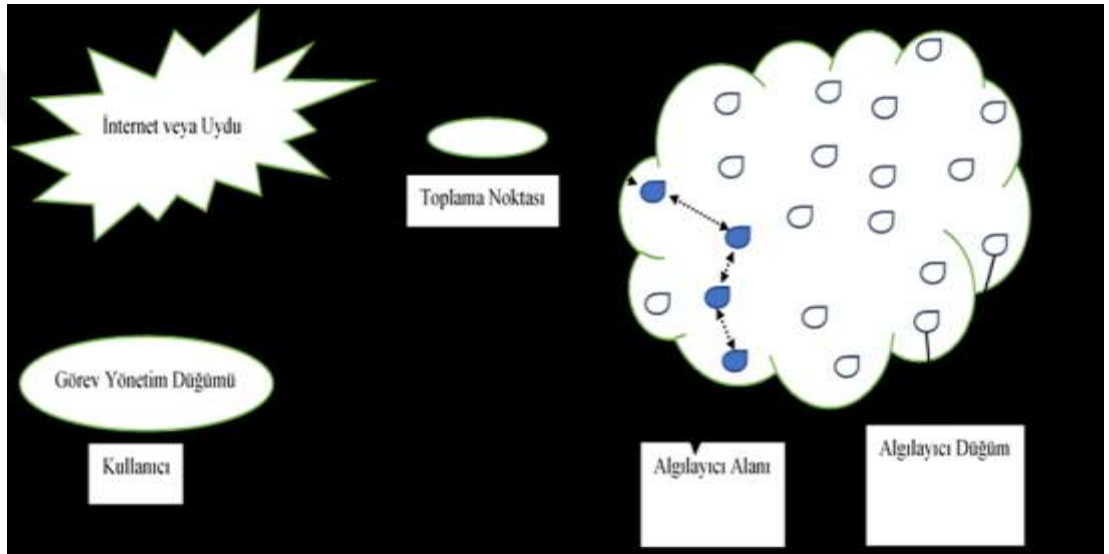
Şekil 2.1 : (a) Ortam enerjili algılayıcı düğüm (b) Geleneksel algılayıcı düğüm

AD'lerin birbirleriyle haberleşmesi kablosuz bir şekilde yapılmaktadır. Kablosuz haberleşme endüstriyel, bilimsel, tıbbi (ISM) bilim dalları için ücretsiz kullanıma sunulan frekans ile gerçekleşmektedir. ISM bandları içerisinde tüm dünyada

kullanım yoğunluğu ve kapasitesinin yüksek olmasından dolayı en çok 2.4 GHz frekansı ile çalışılmaktadır [1].

### 2.3 Algıyıcı Ağların Haberleşme Mimarisi

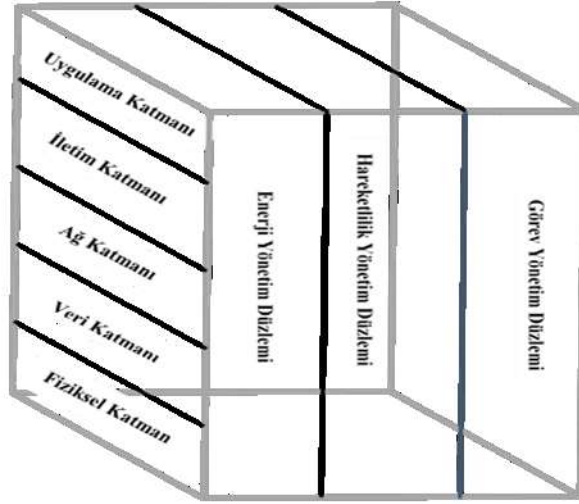
AD'ler belirli bir bölgeye dağıtılarak konumlandırılır. Herbir algılayıcı düğüm bulunduğu konum itibariyle çevresinde algılanması gereken veriyi algılar ve bir sonraki düğüme çok atlamalı bir mimariyle aktarır. Bu aktarma işlemi toplama noktasına kadar devam eder. Verilerin toplandığı toplama noktası ise bilgiyi uydu yada internet vesilesiyle kullanıcının bulunduğu merkeze aktarır [1].



Şekil 2.2 : Algılayıcı düğümlerin bölgeye yayılma ve haberleşmesi

KAA'larda kullanılan haberleşme protokolünde sınırlı kapasiteye sahip olan bataryanın optimum düzeyde enerji tasarrufu sağlaması için batarya yönetimi gerçekleştirildiği gibi aynı zamanda AD'lerin veriyi nasıl ve ne zaman gerçekleştireceğine karar vermektedir. KAA'lardaki protokollerin bu özelliğiyle güç ve rotalama özelliği birleştirilmiş olmaktadır. Bu protokoller bütün düğümler ve merkez düğüm tarafından kullanılmaktadır.

KAA'lar ile OSI katmanları mimarisi arasında göze çarpan bir yakınlık vardır. Ancak OSI katmanından farklı olarak görev yönetim düzlemi, hareketlilik yönetim düzlemi, enerji yönetim düzlemi bulunmaktadır. KAA'larda fiziksel, veri, ağ, iletim ve uygulama katmanları bulunmaktadır.



**Şekil 2.3 :** Algılayıcı ağlardaki haberleşme katmanları ve düzlemleri

Uygulama katmanında kullanılan yazılımlar yapılan algılama işlemine göre değişebilir. Bununla birlikte uygulama katmanı konum belirleyen AD'lerin yönetimini gerçekleştiren algılayıcı yönetim protokolü (SMP), AD'lerin ani vazife taksimatı yapan görev atama ve veri duyurma protokolü (TADAP), AD'lerin sorgulanıp sorgulanan AD'nin cevap vermesini sağlayan algılayıcı sorgu ve veri yayma protokolü (SQDDP) kullanılmaktadır.

İletim katmanı ise AD'lerin algıladıkları bilginin akışını gerçekleştirir. Veri kapasitesi nispeten düşük olan UDP, AD ile sink arasında kullanılırken internetle sink arasında TCP protokolü kullanılmaktadır.

Ağ katmanı, iletim katmanı tarafından iletilen bilginin nasıl bir yol izleyeceğini belirlemektedir. AD'ler ihtiyaç duyulan bölgeye rastgele bırakılmaktadır. Sink denilen toplama noktasına ihtiyaç duyulan verinin iletilmesi herhangi bir yönlendirme olmazsa AD'lerin varolan enerjisininin optimum düzeyde kullanılıp AD'lerin ömrünün uzun tutulması pek mümkün görünmemektedir. Verinin algılandığı gibi toplama noktasına herhangi bir yönlendirme olmadan aktarımı ağ ömrü ve verimi açısından problem teşkil etmektedir [9].

İletim Katmanı'nın yaptığı yönlendirme işleminde temel amaç harcanan enerji miktarını azaltmak, en kısa zamanda iletimi gerçekleştirmek ve kanal verimini artırmaktır. Bu amaçları gerçekleştirmek için algılama işlemi yapan AD, veriyi öncelikle hangi AD'ye yönlendireceğini belirleyen temel koşul, düğümün bataryasındaki enerji miktarıdır. Bataryadaki enerjisi fazla olan düğüm tercih edilir.

Yönlendirme için değerlendirilmesi gereken başka bir parametre de güç tüketiminin minimum olduğu yolu tercih etmektir. İletim esnasında tercih edilen yolda atlama sayısının çok olmaması dikkat edilmesi gereken diğer bir husustur. Verinin gönderilmesinde kullanıcının bilgi talebinde bulunması yada AD'nin algılama işlemini gerçekleştirdiğini bu veriyi göndereceğini ağa birdirmesiyle gerçekleşmektedir [10]. Ortaya çıkan böyle bir durumda kanal yoğunluğuna ve ihtiyaç fazlası enerji tüketimine sebep olan benzer bilginin gönderilmesini önlemek için algılanan bilgileri birleştirerek kullanıcıya iletilmesi gerçekleştirilir.

Veri katmanında veri akışı çoklanır, veri çerçevesi belirlenir, ortam ulaşımı ve hata tespiti gerçekleşir. MAC protokollerinin temel amacı KAA'larda kullanılan düğümlerin iletişiminin nasıl, ne zaman ve nereye gerçekleşeceğini belirleyip kanal performansını artırıp enerji tüketimini azaltmaktır. Ancak Mobil, MANET gibi ağlarda servis kalitesi (QoS) ve bant genişliği daha öncelikli olduğu için MAC protokollerinde enerji tüketimi KAA'lar kadar önemli bir yer tutmuyor. AD'lerin algıladıkları veriyi komşu düğümlerle aynı zaman diliminde toplama noktasına iletmesi yüksek bir ihtimalle gerçekleşiyor. Böyle bir durumun gerçekleşmesi verilerin çarpışmasına neden olmaktadır. Çarpışan verilerin iletimi başarısızlıkla sonuçlanır. Başarısız verinin tekrar gönderilmeye çalışılması kanal yoğunluğuna ve fazla enerji tüketimine sebep olmaktadır. Ortaya çıkan bu problemi çözmek için farklı yaklaşımlar geliştiren MAC protokolleri kullanılmaktadır [1,11].

Fiziksel Katman ise verinin gönderilmesi, verinin alınması, frekans belirleme, modülasyon, bilgiyi şifreleme gibi görevleri yerine getirmektedir.

Enerji Yönetim Düzlemi batarya yönetiminin optimum seviyede kullanılması için düğümün bataryadaki enerji miktarına bağlı olarak veriyi alıp almayacağını ya da gönderip göndermeyeceğini kararlaştırmaktadır. Bununla birlikte Enerji Yönetim Düzlemi eğer bataryadaki enerji seviyesi düşük ise düğüm sadece algılama faaliyeti gerçekleştireceğini yönlendirme işlemi yapmayacağını ayarlayabilmektedir.

Hareketlilik Yönetim Düzlemi, algılayıcı düğümün herhangi bir durumda yer değişikliği söz konusu olduğunda hareketini kontrol eder. Bu takip sonunda AD'nin konumunun belirlenmesi daha rahat olur. Herhangi bir vazife taksimatı söz konusu olduğunda AD'lerin komşuları ve enerji miktarları göz önünde bulundurulması kolay bir şekilde gözlemlenebilir.

Görev Yönetim Düzlemi'nde, algılayıcı düğümlerin kalan enerji miktarlarına, yoğunluklarına göre vazife dağılımı yapılmaktadır. Bu uygulama neticesinde enerji seviyesi düşük olan AD'ler daha az kullanılırken bataryadaki enerjisi fazla olan AD'lere ise daha çok vazife verilmektedir.

Enerji Yönetim Düzlemi, Hareketlilik Yönetim Düzlemi ve Görev Yönetim Düzleminde asıl amaç algılayıcı düğümlerin beraber uyumlu bir şekilde çalışmasını gerçekleştirmektir. Düzlemlerin üzerlerine düşen görevleri yapmaması durumunda AD'ler diğer algılayıcı düğümlere bağlı olmadan görev yapacaklardır. Bunun sonucunda kanal verimi düşmekte, bataryadaki enerji kısa sürede bitmekte ve sağlıklı bir bilgi alış verişi gerçekleşmemektedir [1,12].

## **2.4 Çoklu Erişim Teknikleri**

Birçok kullanıcının bir erişim ortamını kullanması kapasitesi düşük olan kanal için problemler ortaya çıkarır. Problemin ana nedeni algılayıcı düğümlerin aynı zaman diliminde paket iletimini veya paket alımını gerçekleştirmek istemeleridir. Aşağıda açıklanan teknikler ortaya çıkan bu problemi algılayıcı düğümlerin nasıl ve hangi zaman diliminde hareket edeceklerini koordine etmek için geliştirilmiştir.

### **2.4.1 Frekans bölmeli çoklu erişim (FDMA)**

Çoklu erişim tekniklerinden ilk kullanılanı FDMA'dır. Çoklu erişim protokolünde aynı zaman diliminde kanala erişim gerçekleştirilirken ortaya çıkan problemi çözmüştür. Kanalin kullandığı bant genişliği frekans dilimlerine ayrılmıştır. Herbir kullanıcı için farklı frekans band tahsisi yapılır. Komşu frekanslar arasında girişimin en az seviyede olması için aralarına koruma bandı bırakılmalıdır. FDMA'nın avantajı kullanıcının istediği zaman diliminde veri iletimi gerçekleştirebileceği esneklik ve sadeliğinin olmasıdır. Dezavantajı ise kanal için tahsis edilen frekans diliminin sadece belli sayıda kullanıcıyla sınırlı olması ve komşu kullanıcıların girişimini engellemek amacıyla kullanılan koruma bantlarının fazla yer tutup kullanılacak kanal sayısını azaltmasıdır [1].

### **2.4.2 Zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA)**

TDMA, birden fazla kullanıcının aynı frekansta ancak farklı zaman diliminde iletişimini gerçekleştirir. Dijital paketlerin iletiminde çok tecih edilir. Zaman

senkronizasyonu ile kullanıcıların hangi zaman aralığında ağa girebileceğinin ayarlanması yapılır. Olası paket çarpışmalarını önlemek için kullanıcı için belli bir süre beklenmelidir. Çünkü paket iletiminde gecikmeler meydana gelebilir [1].

### **2.4.3 Kod bölmeli çoklu erişim (CDMA)**

CDMA'da kullanıcı aynı zaman diliminde ve aynı frekans aralığında haberleşmeyi gerçekleştirir. Bütün kullanıcılarda, iletimi gerçekleştirmek için kullanıcıların ürettiği sinyalleri çoğullayan bir yayılma kodu mevcuttur. Gelen sinyali yeniden üretip çoğullamak için alıcı da aynı sinyali kullanır. Kodu çözülmüş diğer sinyaller arka plan gürültüsü olarak değerlendirilir. CDMA çalışırken kullanıcıların zaman senkronizasyonunu yapmaya ihtiyaç olmaması ve kullanıcı sayısının az olduğu zamanda iyi bir performans sergilemesi avantajlarından biridir. Ancak kullanıcı sayısında yapılan artış alıcı tarafında yüksek bir gürültüye neden olması ise CDMA'nın dezavantajlarından biridir. CDMA'nın MAC protokollerinde en az kullanılmasında etki eden bir diğer sebep ise çoğullanan yayılma kodunun bazen çözülmesinin mümkün olmamasından kaynaklanmaktadır [1].

### **2.4.4 Rastgele çoklu erişim**

Bu tekniğin çalışma prensibinde kullanıcılar koordine edilmeden ya da asgari seviyede koordine edilerek haberleşmeyi gerçekleştirirler. Çok sayıda kullanıcının aynı zaman diliminde paket gönderme işlemini gerçekleştirmek istemesi sonucunda paket çarpışması kaçınılmaz olur. Çarpışmanın meydana gelmemesi için CSMA tabanlı başka kullanıcılardan iletimin istenilen şekilde gerçekleşmesi için ortamda dinleme yapılır. Ortamda paket iletimi için uygun şartlar mevcut ise haberleşme işlemi gerçekleşir. Bu tekniğin basit teknik ve uygulamasının çok kolay olması popülaritesini artırırken koordineli bir şekilde çalışmaması ise dezavantaj olarak görülmektedir [1].

## 2.5 MAC Protokolleri

### 2.5.1 Çekişme tabanlı MAC protokolleri

#### 2.5.1.1 Taşıyıcı algılama çoklu erişim( CSMA)

CSMA, çarpışma algılama (CSMA/CD) ve çarpışmadan kaçınma (CSMA/CA) olarak iki farklı kullanım şekli olan ve geniş bir kullanım alanına sahip bir protokoldür [13]. Geliştirilen bu protokol ortamı dinleyerek kanalın boş olup olmadığını tespit eder. Eğer iletimin yapılacağı ortam müsait ise veri iletimi başlar. CSMA/CD’de kullanıcılar paket iletimini gerçekleştirirken diğer kullanıcıların aynı zaman diliminde transfer işlemini yapıp yapmadığını tespit eder. Eğer eş zamanlı olarak paket iletimi varsa haberleşme gerçekleşmez. CSMA/CD çift yönlü olarak haberleşmeyi gerçekleştirdiği için donanımsal uygulamalarda tatbiki birçok zorluğu da beraberinde getirir. Bundan dolayı CSMA/CD çoğunlukla yerel alan ağlarında kullanıldığı için kablolu ortamlarda daha çok tercih edilmektedir. CSMA/CA yaklaşımında iletişimin gerçekleşeceği ortam veri paketinin iletimi için müsait olsa bile kullanıcı çarpışma olasılığına karşı bir müddet bekleme yapar. Çarpışmanın olmaması için RTS, CTS, DATA ve ACK paketleri alıcı ve verici arasında gönderilir. Kullanıcı veri iletimini gerçekleştirmeden önce alıcı ile irtibat kurmak ve iletim ortamı için kendisine yer ayırtmak için RTS özel paketini gönderir. Alıcı, RTS paketini aldıktan sonra CTS paketini göndererek veri almak için uygun olduğunu vericiye bildirir. Verici, göndermesi gereken veriyi DATA paketiyle gönderir ve en sonunda alıcı ise paketi aldığı bildirmek için ACK paketiyle cevap verir. Yukarıda bahsi geçen protokol paket çarpışmasını önleyerek CSMA/CA’nın tercih edilebilirliğini artırırken eş zamanlı olarak gönderilen RTS paketlerinin çarpışması ise CSMA/CA’nın olumsuz bir yönü olarak karşımıza çıkmaktadır.

#### 2.5.1.2 Sensor MAC (S-MAC)

S-MAC, üzerinde en çok çalışılan RTS-CTS tabanlı bir MAC protolüdür. Algılayıcı düğümler veri alış-verişi olmazsa uyku modunda olur. İletişim gerçekleşeceği zaman uyanır. Veri geleceği zaman dinleme işlemi yapar. En sonunda eğer paket iletimi olmayacak ise tekrar uyku moduna geçilir. S-MAC protokolünde göndereceği paket büyüklüğü fazla olan algılayıcı düğümlere öncelik verilir. Periyodik olarak uyku ve dinleme moduna geçen algılayıcı düğümler diğer düğümlerle eş zamanlı olarak aynı

zaman dilimini kullanmamaları için algılayıcı düğümler arasında SYNC paketi paylaşılır. Her algılayıcı düğüm komşunun uyku zamanını belleğinde tutar. Algılayıcı düğümler nasıl bir yol izleyeceklerini ve hangi zaman aralığında uyku ve dinleme moduna geçeceğini komşularını haberdar eder. Veri iletimi olması için vericiden alıcıya gönderme isteği (RTS), alıcıdan vericiye ise gönderim onayı (CTS) gönderilir. Daha sonra ise DATA ve ACK paketlerinin iletimi gerçekleşir. Böylece paket çarpışma ihtimali minimum seviyeye indirilmiş olmaktadır [14]. S-MAC protokolü lokal olarak senkronize edildiği için uyumsuzluk gibi dezavantajları vardır. Ancak bununla beraber batarya yönetiminde diğer MAC protokollerine göre çok daha fazla başarılı olduğunu söylenebilir [15].

### **2.5.1.3 Zaman aşımı MAC (T-MAC)**

T-MAC'te hedef, KAA'ların muzdarip olduğu sınırlı kapasiteye sahip bataryadaki enerjinin optimum düzeyde kullanılmasını gerçekleştirmektir. CSMA ve S-MAC protokollerinde olduğu gibi çakışmayı minimum seviyede tutmayı amaçlamaktadır. Ancak S-MAC protokolünde olduğu gibi T-MAC periyodik bir görev döngüsüne sahip değildir. T-MAC'te görev döngüsü algılayıcı düğümün bulunduğu şartlar göz önünde bulundurularak ayarlanmaktadır. T-MAC protokolü, algılayıcı düğümlerin enerji tüketimini daha düşük seviyeye düşürmek için boşa dinlemeyi azaltmayı hedeflemektedir. Paketler farklı boyutlarda iletilmekte ve verici düğümler paket iletimini gerçekleştirdikten sonra uyku moduna geçmektedir. Paket iletim süresi, RTS ve yayılma süresinin toplamından daha uzun sürerse zaman aşımı (TA) gerçekleşmiş olmaktadır. TA zaman aşımına kadar alıcı herhangi bir paket alımını gerçekleştirmemişse uyku moduna geçmektedir. T-MAC, paket alış verişi gerçekleştirdikten sonra mevcut ağ trafiğinin durumunu takip etmek için algılayıcı düğümün uyanık kalmasını sağlamaktadır. T-MAC, algılayıcı düğümlerin çekişmenin başarısız sonuçlanmasıyla future request-to-send (FRTS) ile erken uyku sorununu çözmeyi vaat etmektedir. FTRS paketiyle veri alımı önceden belirlendiği için vaktinde uyku moduna geçilmiş olunur ve böylece boşa dinleme yapılmamış olunmaktadır. T-MAC, S-MAC'e göre batarya yönetiminde daha başarılı ancak gecikme performansında ise birbirlerine yakın verimi almaktadırlar [16].

#### **2.5.1.4 Berkeley medya erişim protokolü (B-MAC)**

B-MAC, CSMA tabanlı olup enerji tüketimini en düşük seviyede tutmak, boşa dinlemeyi asgari seviyeye çekmek, görev döngüsünü düşürmek, küçük kod boyutu kullanmak ve birçok ölçeklenebilir algılayıcı düğüm kullanmayı hedeflemektedir. B-MAC, uyarlanabilir giriş örnekleme şemasıyla, boşa dinleme ve görev döngüsü süresini azaltarak enerji tüketimini daha düşük seviyelere getirmektedir. Paket iletimini gerçekleştiren algılayıcı düğüm, alıcı düğümün kanal durumunu algılamak için belli bir uzunlukta giriş paketi göndermektedir. Eğer kanal veri göndermek için müsait ise alıcı düğüm uyanık kalmakta; paket alımı olmaz ise alıcı düğüm tekrar uyku moduna geçirilmektedir. Algılayıcı düğüm eğer uyku modunda değilse giriş paketi için beklemektedir. Giriş paketi ve veri gönderimi gerçekleştirdikten sonra düğüm enerji tasarrufu sağlamak için tekrar uyku moduna geçmektedir. Böyle bir durumda tüm algılayıcı düğümlerin paket alımı için uyku modundan çıkması ise B-MAC potokolün dezavantajını ortaya koymaktadır. B-MAC, çalışırken tekrar yapılanmayı sağlamakta ve ağ verimi artırmak için çift yönlü arayüzler hizmetini sunmaktadır. CCA (kanal boşluk tespiti) ile kanalda çarpışmanın gerçekleşmemesi için kanalın müsaitlik durumu kontrol edilmektedir. LPL (düşük güç kullanımı ile dinleme) ile AD'nin uyku moduna geçişi sağlanmaktadır. KAA'larda algılayıcı düğümün açılırken yaptığı masraf protokollerin hepsinde aynıdır. Maliyet farkı kanal açıldıktan sonra ne kadar bir süre beklediği ve açılmasının kaç defa gerçekleşmesinden kaynaklanmaktadır. Kanal veri akışı için uygun duruma geçirildiğinde birden fazla işlem yapmaktadır. İlk durumca düğüm uyku modunda olup, zamanlayıcı ile uyku modundan çıkmaktadır. AD uyku modundan çıktıktan sonra ağın yapılandırılmasını gerçekleştirmekte ve başlama durumuna getirmektedir. Yapılanma sonucunda radyo alıcı moduna geçmiş olmaktadır. ADC kazancının hesaplanması başlamasıyla haberleşme sonlanır ve ADC'deki değerler hesaplanır. LPL'nin hedeflemiş olduğu boşa iken enerji tasarrufu sağlama protololu sayesinde herhangi bir haberleşme yoksa uyku moduna geçilmektedir [17].

#### **2.5.1.5 Alıcı tarafından başlatılan M AC (RI-MAC)**

Sınırlı enerjiyi depolama kapasitesine sahip bataryanın kullanıldığı KAA'larda boşa dinleme gereksiz enerji tüketimine sebep olmaktadır. Verici tarafından başlatılan haberleşme sistemlerinde verici iletişimi başlatmak için paket göndermekte, alıcı ise

uyku modundan çıktıktan sonra paketi almaktadır. Alıcının uyku modundan çıkana kadar ki sürede verici boşa dinleme yapmaktadır. Varolan bu problemi çözmek için alıcı başlamalı MAC (RI-MAC) protokolü önerilmiştir. RI-MAC protokolünde haberleşme, alıcının işaret paketini göndermesiyle başlamaktadır. RI-MAC protokolünde verici, alıcının göndereceği işaret paketini beklemekte ve beklenen bu paket alıcı tarafından gönderilene kadar verici dinleme yapmaktadır. Bu protokolde sadece işaret paketi ve veri paketi ortamın trafik yoğunluğuna sebep olmaktadır. Alıcının işaret paketini göndermesiyle başlayan haberleşme sonucunda boşa dinleme ve ortamın trafik yoğunluğu azalmaktadır. Bu durum enerji tüketiminde azalmaları beraberinde getirmektedir [18].

#### **2.5.1.6 Öngörülü uyandırma MAC (PW-MAC)**

PW-MAC, asenkron görev döngüsüne sahip ve alıcı tarafından haberleşme başlatılan bir protokoldür. Haberleşmenin alıcı tarafından başlatılması, vericinin alıcının uyku moduna göre veri akışını gerçekleştirmesine neden olmaktadır. Bu durum boşa dinlemeden kaynaklı enerji tüketimini minimum seviyeye düşürmektedir. Bu protokolde verici alıcıdan kısa bir süre önce uyanmaktadır. Bu durum alıcı ve vericinin görev döngülerinin daha kısa olmasına neden olmaktadır. Algılayıcı düğümler isteğe bağlı olarak görev döngülerini bağımsız sözde rastgele uyanma şeması kullanarak uyuma sürelerini hesaplamaktadırlar. Böyle bir yaklaşım sergilemekteki hedef, komşu algılayıcı düğümlerin aynı zaman diliminde uyanmasının önüne geçip çarpışmanın önüne geçmektir. PW-MAC, komşu düğümler arasında sözde rastgele sayı üretimi için RI-MAC protokolünde parametre değişimi için kullanıldığı gibi benzer işaret paketi kullanılmaktadır. Böyle bir yaklaşım herbir algılayıcı düğümün komşu düğümlerinin uyku modlarını hesaplamasının önünü açmaktadır. Bir düğüm uyandığında haberleşme için müsait olduğunu bildirmek için işaret paketini yollamaktadır. PW-MAC protokolünün getirdiği avantajla beraber ortaya çıkan dezavantaj yüksek ek yükü beraberinde getirmesidir. Bu ek yük ise daha yüksek yoğunluklu ağlarda verimsiz çalışmaktadır [19].

## **2.5.2 Program tabanlı MAC protokolleri**

### **2.5.2.1 Düşük enerji uyumlu kümeleme hiyerarşisi (LEACH)**

LEACH, sensör ağında güç tüketiminin asgari seviyede tutulması için rotalama protokolü ve uyarlanabilir kümeleme tabanlı MAC protokolünü kullanan ve kendi kendine organize olabilen program tabanlı bir MAC protokolüdür. LEACH protokolünde belli bir mesafedeki düğümler bir kümeyi oluştururlar ve oluşturulan bu kümede bir düğüm küme başı olarak görevlendirilir. Hangi düğümün küme başı olarak seçileceği kurulum aşamasında yapılmaktadır. Küme başı seçimi başarıyla tamamlandıktan sonra küme başının yapması gereken görevlerden birincisi kümeyi koordine etmek ikincisi ise düğümlerden aldığı verileri merkez istasyona iletmektir. Küme başı olarak seçilen düğüm küme içindeki diğer düğümlere nispeten daha fazla enerji tüketimi yapmaktadır. Ortaya çıkan bu problem küme başı olan düğümün kalan enerjisinin daha kısa bir sürede tüketip işlevsiz hale gelmesine neden olmaktadır. Bunun için küme başı değişimi düğümlerin kalan enerji miktarlarına bağlı olarak sürekli olarak değişmektedir. LEACH protokolünde küme içindeki her düğüm küme başıyla direk olarak iletişim kurabilmektedir. Düğümler algıladıkları verileri küme başı tarafından oluşturulan TDMA programı kullanarak göndermektedir. Bu programın kullanımıyla düğümler, herhangi bir veri akışı yoksa enerji tasarrufu için iletişim kanallarını kapatmaktadır. Her küme komşu küme ile herhangi bir girişim olmaması için farklı CDMA kodu kullanmaktadır. LEACH protokolünün koordineli çalışıp enerji tüketimini asgari seviyede tutmasıyla beraber her düğümün düğüm başı olabilmesi ve merkez istasyon ile iletişim kurabilmesi oldukça karmaşık bir yapıyı da beraberinde getirmektedir. Bu karmaşıklığı çözmek için küme başı olarak seçilecek olan düğümler ağın belli bölgelerine yerleştirilmektedir. Böylece bazı düğümler haberleşme boyunca küme başı olarak seçilmemektedir. Düğümlerin bataryalarındaki enerji sınırlı olmasından dolayı kümeler için farklı CDMA kodlarını oluşturmak mümkün olmayabilmektedir [20].

### **2.5.2.2 Trafığe uyarlanabilir ortam erişim protokolü (TRAMA)**

TRAMA, çarpışmasız algoritması kullanan TDMA tabanlı bir protokoldür. TRAMA protokolünün geliştirilmesiyle kanal kullanımı artmakta ve enerji tüketimi hedeflenen seviyeye ulaşmaktadır. İki atlamalı komşuların çarpışmalarını engellemek için dağıtılmış seçim algoritması kullanılmaktadır (gizli terminal sorunu). Program

tabanlı olan TRAMA protokolünde vericinin göndereceği herhangi bir paket yoksa düğümün uyku moduna geçmesine müsaade ederek güç tüketimini azaltarak ağın daha düşük bir güçte çalışmasını sağlamaktadır. Kullanılan ağın yoğunluğuna bağlı olarak algılayıcı düğümlerin aktif/pasif durumlarını ayarlama esnekliğini bu protokol sunmaktadır. Düğümler iki sekmeli komşularının bilgi ve iletim programlarını değiş tokuş ederek ortak bir program ayarlayabilmektedir. Bunu yapmak için TRAMA; iki sekmeli komşu bilgileri için (1) the Neighbour Protocol (NP), iletim program bilgileri için (2) the Schedule Exchange Protocol (SEP), SEP ve NP'den elde edilen bilgiler vesilesiyle mevcut bir zaman aralığında alıcı ve verici seçimi için (3) the Adaptive Election Algorithm (AEA) bu üç bileşenleri içermektedir. Bu protokolda zaman, hem veri hem de sinyal iletimini tek bir dilimde gerçekleştirmektedir. Rastgele slotlar data ve sinyalin gönderilmesinde kullanılmaktadır. NP, iki atlamalı komşu düğümlerin bilgilerini bildirmek için bir sekmeli komşuların bilgilerinin yayımlandığı sinyal yuvalarını kullanmaktadır. SEP ise düğümler arasında programları değiştirmek için iletim yuvalarını kullanmaktadır. TRAMA protokolünün getirdiği avantajlarla beraber ortaya çıkan dezavantajı, komşu bilgilerinin ve program değişimi yapılırken işlem yükünün artmasıdır. Rastgele peryotlar kanal kapasitesini ez az %12.5'ini meşgul etmektedir [21].

### **2.5.2.3 Öncelik tabanlı MAC (PRIMA)**

PRIMA, TDMA ve CSMA'nın avantajlarını kullanarak sınırlı kapasitedeki enerjinin daha uzun sürede kullanılmasını amaçlamaktadır. Kontrol paketinin gönderilmesi CSMA tarafından gerçekleşirken veri paketleri ise TDMA slotları ile gönderilmektedir. PRIMA'da kümeleme algoritması ve kanal erişim mekanizması olmak üzere iki temel bileşen mevcuttur. Her tur bir zaman dilimine bölünür. Her tur bitiminde ise küme başı seçimi tekrarlanmaktadır. Seçilen küme başları, küme başı seçimi için aday düğümlere mesaj gönderir. Daha sonra her düğüm düşük enerji kullanarak varabildiği bir küme başına katılır. Kanal erişimi, Classifier MAC (C-MAC) ve Channel Access MAC (CA-MAC) olarak iki adımda gerçekleşir. C-MAC'te uygulama katmanı tarafından paketlerin öncelikli derecesini göstermek için ekstra iki bit eklenir. CA-MAC'ta ise veri transferi için programlanmış yuvaları (TDMA) ve periyodik kontrol paketleri için rastgele yuvalar (CSMA) kullanılır. LEACH protokolünde olduğu gibi küme başının enerjisi bitirse küme içindeki tüm düğümler merkez düğüm ile haberleşemediği için iş göremez pozisyonunda dururlar.

Bu durum sonraki turda küme başı seçilene kadar devam edecektir. PRIMA'da kontrol paketleri işlem yükünü arttırmaktadır [22].

### **2.5.3 Hibrit MAC protokolleri**

#### **2.5.3.1 Zebra MAC (Z-MAC)**

Z-MAC, trafik yükünün düşük olduğu durumlarda CSMA tekniğini ve trafik yükünün çok daha yüksek olduğu durumlarda ise TDMA tekniğini kullanan hibrit bir protokoldür. Protokolün komşu ve komşu durumunu belirleme ihtiyacı varsa Z-MAC ön kurulum aşamasını yapması gerekmektedir. Tek atlamalı olarak gönderilen sing paketi komşuyu bulmamıza yardımcı olur. Komşu keşfi gerçekleştikten sonra düğümler iki atlamalı komşu bilgilerini listelerler. Her düğümde böyle bir listenin olması iki sekmeli komşunun aynı slotu kullanmasını engellemek ve sonuç olarak çarpışma durumu minimize edilmiş olmaktadır. Z-MAC protokolünde her düğümün sahip olduğu birer slot mevcuttur. Eğer düğüm slotu kullanmayacaksa komşu düğüme geçici süreliğine verebilir. Z-MAC, düğümlerin herhangi bir iletim yuvası için çekişmelerine müsaade ettiği Low Contention Level (LCL) ve sadece slotun bulunduğu düğümler ile tek atlamalı komşularıyla çekişmeye girebildiği High Contention Level (HCL) olmak üzere iki modda işlem görmektedir. Explicit Contention Notification (ECN) paketleri düğümlere iki atlamalı komşulara slot gönderiminin yapılmaması gerektiği bilgisini verir. Düğümün HCL moduna geçişi ECN paketini almasıyla gerçekleşir. Z-MAC, CSMA ile karşılaştırıldığında düşük trafik yüklerinde birbirlerine yakın performans sergiliyorlarken çekişme seviyesi artması Z-MAC'ın tercih edilebilirliğini arttırmaktadır [23-24].

#### **2.5.3.2 Y-MAC**

Y-MAC, TDMA tabanlı ve çok kanal kullanımına müsaade eden MAC protokolüdür. Bu protokolle beraber gecikme süresi azalmakta ve enerji kullanımı daha da ideal seviyede gerçekleşmektedir. Zaman, bir yayından oluşan karelere bölünür ve bir dizi slot içeren herbiri ile tek yönlü bir gönderim gerçekleşir. Yayın periyodunda, gizli terminal sorunu ve çarpışmalardan kaçınmak için düğümler bilgilerini komşularıyla değiştirirler ve kullanıcılar için yuva belirlemesi yaparlar. Haberleşme esnasında herhangi bir düğüm komşusuyla iletişim kuramazsa düğüm iletişim kuramadığı komşusunu komşuluk listesinden çıkarır ve daha sonra düğümün slotu kullanılabilir

olarak değerlendirilir. Her slotun başında birçok verici olması durumunda paketlerin iletimi daha önce belirlenmiş olan atlama sırasına göre belirlenir (frekans atlama). Y-MAC protokolünde düğümlerin kullanabileceği birkaç frekans tahsisi yapılır. Tahsis edilen frekanslardan birisi temel frekans olarak isimlendirilir. Ayrıca kontrol paketi ile verinin bulunduğu frekanstır. Aynı alıcıya birden fazla verici talip olması durumunda ise verici tahsis edilen diğer frekansa atlayabilir. Düğümlerin ortak olarak kullanıldıkları kanalda minimum bir paket alabilmesi Y-MAC protokolünün sağlamış olduğu avantajlardan birisidir [25].

### **2.5.3.3 CSMA/TDMA hibrit**

IEEE 802.15.4 standardına dayalı CSMA/CA ve TDMA'nın artı yönlerini bir araya getirerek kanal verimini artırmak ve güç tüketimini hedeflenen seviyeye düşürmek için geliştirilen MAC protokolüdür. Bu protokolda hedeflenen başarı 802.15.4'ün çekişmeli erişim periyoduna TDMA tekniğini dahil etmektir. TDMA, ağdaki çarpışmalar ve düğümlerin veri kuyruğuyla ilgili olarak CSMA/CA ile TDMA arasındaki çekişme erişim süresini ayarlamak için koordinatörlük görevi yapmaktadır. Düğümlerin koordinasyonu koordinatörün belli bir zaman diliminde işaret paketini göndermesiyle sağlanır. Bu yaklaşım kanal verimi, geçikme ve enerji kullanımında 802.15.4'ten daha iyi bir performans gösterdiği belirlenmiştir [26-27].

### **2.5.4 RL tabanlı MAC protokolleri**

Geliştirilen Reinforcement Learning (RL) tabanlı şemaların çoğu görev döngüsünün başarılı bir şekilde uygulanabilirliğini amaçlamaktadır. RL, KAA'nın davranışlarını deneme yanılma yoluyla öğrenerek tespit eder. Davranış tespiti sonucunda algılayıcı düğümün nasıl bir performans izleyeceği kararlaştırılır. RL tabanlı protokoller, ağın geçmişteki haberleşme yoğunluğuna bakarak düğümlerin uyku modunda olup olmadığını tahmin edebiliyor. Yapılan bu tahminle bereber düğümlerin boşta dinleme ve kulak misafiri gibi enerjinin boşa harcanmasının önüne geçilmiş olmaktadır [28].

#### **2.5.4.1 RL-MAC**

Reinforcement Learning (RL) tabanlı olan RL-MAC, düğümlerin periyodik olarak görev tahsisini başarılı bir şekilde gerçekleştirmektedir. Bu yaklaşım S-MAC protokolünün temel yaklaşımından esinlenmiştir. RL-MAC protokolünde uyku

modu, yerel ve komşu gözlemlerine bağlı olarak ayarlanmaktadır. Yerel gözlemlerde görev döngüsünün belirlenmesinde düğümlerin hedefe ulaşan paketlerin kaydedilmesi gerekmektedir. Komşu gözlemlenmesinde ise hedefe ulaşmayan paket sayısı başlığa eklenmektedir. Başarısız paketlerin sayılmasındaki amaç çarpışmayı azaltıp enerji verimliliğini arttırmaktır. Bu protokolün katkısı Markov Decision Process (MDP)'yi kullanarak çevre düğümlerin durumlarını çıkarabilirler. S-MAC ve T-MAC ile yüksek kanal yükünde karşılaştırıldığında enerjinin tasarruflu kullanımı ve kanal veriminde RL-MAC daha başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir [29]. Sadece yerel gözleme dayalı olan sensor düğümlerin görev döngülerini programlamak için merkezi olmayan RL yaklaşımı geliştirilmiştir. Bu yaklaşım ile beraber iletim yoluna bağlı olarak değişen süreye göre periyot değiştirilebilmektedir. S-MAC protokolünde olduğu gibi komşu şubelerinde düğümlerin programı paket kayıpları ve girişimden kaçınmak için uyanma vakitleri senkronize edilmemişken birbirleriyle haberleşmesi gereken düğümlerin uyku modları senkronize edilmiştir. Aktif periyotlar zaman dilimlerine bölünmüşler. Bir düğümün uyanacağı slotlar öğrenme yoluyla belirlenir. Çerçeve içindeki slotların başarı oranlarına bağlı olarak kalite değeri verilir. Slotların kalite değeri, eğer slot verimli bir iletişim gerçekleştirmişse değer artırılır. Başarısız bir iletişim gerçekleşmişse kalite değeri azaltılır. Öğrenme sonucunda bir grup slotun kalite değeri daha yüksek olacaktır [30].

#### 2.5.4.2 ALOHA-Q

ALOHA-Q, Slotted Aloha ile Q-Learning yaklaşımını birleştirmiştir. ALOHA-Q ile beraber enerji tasarrufu sağlanmış ve kanal veriminde artış gözlemlenmiştir. Veri iletiminin gerçekleştiği her çerçevede tekrarlanan zaman dilimleri mevcuttur. Düğümler, çerçeve içindeki herbir zaman dilimlerinde Q-değerini tutarlar. Q-değeri, slotun gerçekleştirdiği herbir paket gönderiminde güncellenir. Q-değerine bağlı olarak slotun popüleritesi de değişmektedir. Paket iletimi alıcıya başarılı bir şekilde ulaşmış ise alındı (ACK) paketi vericiye gönderilir. Düğümler veri akışında başarı göstermişse Q-değerinde olumlu bir güncelleme yapılır. Aksi bir durum varsa düğüme ceza verilir. Q-değerinde olumlu bir güncelleme veri iletimi tekrar gerçekleşeceği zaman düğüme öncelik vermesinin önünü açmaktadır. Başarılı iletimi gerçekleştiren düğüme sağlanan öncelik başarısız veri iletimi gerçekleşene kadar devam etmektedir. Öğrenme süreci sonunda düğümlere tahsis edilen slotlar sabit

durum şartı sağlayan bir ağın ortaya çıkmasına yol açar. ALOHA-Q ile ereve içinde yeterli sayıda slotların olması gerekmektedir. erevenin slot sayısı düşük olursa kanal verimine negatif bir etki yapar. Yapılan alışmalar ALOHA-Q'nun tek atlamalı senaryosu ile gerçekleştirilmiştir [31-32]. ALOHA-Q yaklaşımı, karmaşık işlem ve ek yük getiren protokollerin ortaya çıkardığı problemlere çözüm getirmiştir. Aloha-Q, düşük seviyedeki ek yükü, akıllı slot seçimi ve sadeliği popülaritesini arttırmaktadır. Bu protokolde tek ek yük alıcı tarafından alınan verinin vericiye bildirmek için ACK paketidir. Diğer protokollerle kıyaslandığında, RL işlemi, haberleşme öncesi komşu düğümlerle bilgi alış verişine ve kanal erişimi için önceden koordinasyona ihtiyaç duymaz [33].

#### **2.5.4.3 RL-ALOHA-IR**

ALOHA ve Reinforcement Learning tabanlı Informed Receiving sahip (RL-ALOHA-IR) Aloha-Q ile benzer yaklaşımı göstermektedir. RL-ALOHA-IR pekiştirmeli öğrenme yöntemiyle Q-değerini belirler. Her düğümün sahip olduğu ağırlık değerini, yaptığı başarılı iletim sonunda +1 arttırılarak ödüllendirilirken başarısız olması durumunda ise -1 azaltılarak cezalandırılır. ALOHA-Q ile RL-ALOHA-IR bu ana yaklaşımı baz alarak haberleşmeyi gerçekleştirirler [34].

#### **2.5.4.4 QL-MAC**

QL-MAC, Q-learning tabanlı olup algılayıcı düğümlerin görev döngülerinin verimli bir şekilde nasıl gerçekleşeceğini hesaplamaktadır. QL-MAC protokolünde, düğümler kendi ağ yoğunluklarıyla bereber komşu ağ yoğunluklarını göz önünde bulundururlar. Bu yaklaşım, merkezi olmayan RL protolüyle yakın bir yol izlemektedir. Zaman çok daha küçük dilimlere bölünmüştür. Q-Learning yaklaşımını kullanan düğümler, uyku modunda olmayan düğümlerin toplam slot sayısını sınırlamaktadır. ereveyi oluşturan, ereve uzunluğu ve slot sayısı değişim göstermemektedir [35].

### **2.6 Çoklu Ortam Enerjisi Kaynakları**

Kablosuz algılayıcı ağ, birçok algılayıcı düğümün bir araya gelmesiyle meydana gelir. Algılayıcı düğümler; çevredeki verileri algılamak üzere sensor, veriyi anlaşılır hale getirmek için işlemci, işlenen veriyi alıcıya iletmek için anten ve güç

kaynağından oluşmaktadır. KAA'lar için aşılması gereken en önemli sorun sınırlı kapasitedeki batarya ile en uzun ağ ömrünü gerçekleştirmektir. KAA'lar, genellikle ihtiyaç duyulan bölgeye gelişi güzel bırakıldığı için pilin enerjisi bittiği vakit değiştirmek pek uygulanabilir olmamaktadır. Bataryadaki enerjinin bitmesiyle algılayıcı düğümün ömrünün bitmesi demektir. Ortaya çıkan bu sorunu çözmek için öncelikle batarya yönetimini gerçekleştirmek için birçok MAC protokolü geliştirilmiştir. MAC protokolleriyle gerçekleştirilen batarya yönetimi algılayıcı düğümün ömrü bir müddet uzatmıştır. Ancak sınırlı enerji ne kadar verimli kullanılırsa da sonunda bitecektir. Bu nedenle güneş, termal, titreşim, rüzgar, piezoelektrik etki, RF enerji hasadı gibi ortam enerjisini kullanmak için birçok yaklaşım geliştirilmiştir [1,36]. Yakın zamanda titreşim, elektromanyetik dalga, rüzgar gibi ortam enerji kaynaklarında hedeflenen verimi alabilmek için enerji hasat sistemleri, cihazları, topolojisi ve devrelerinde önemli çalışmalar yapılmıştır [37].

### **2.6.1 RF enerji hasadı**

Radyo Frekansı (RF) enerji hasadını elektromanyetik dalgadan gelen enerji ile gerçekleştirmektedir. Güneş, rüzgar gibi ortam enerji kaynaklarına göre güç yoğunluğunun daha düşük olması dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak enerjinin sürekli olması RF enerji hasadının tercih edilebilirliğini arttırmıştır. RF enerji hasadından elde edilen güç  $0.2 \text{ nW/cm}^2 - 1 \mu\text{W/cm}^2$  aralığındadır. Bu aralık diğer enerji hasadı sistemlerine nispeten düşüktür. Bu durumun kısmi çözümü için verimi yüksek olan anten kullanılması gerekmektedir. RF enerji hasadı analog/digital TV, WiFi ağlar, AM/FM radyo, hücresel ağlar gibi yayın altyapısının artış göstermesiyle tercih edilebilirliği de artmıştır. RF enerji hasadı şehir merkezlerinde, güç kaynaklarına yakın bölgelerde daha çok yapılmaktadır. RF enerji hasadı sisteminin kullanılabileceği uygulama alanları genellikle ulaşılması zor alanlar olup bataryanın şarj edilmesi veya değiştirilmesinin mümkün olmadığı köprüler, kimyasal fabrika, uçak gibi alanlardır. RF enerji hasadının öne çıkan en önemli özelliği ortamda çok düşük bir güç olsa dahi hasat işleminin sürekli olmasıdır. Farklı tip antenler ile diğer enerji hasat yöntemleriyle de kolay bir şekilde entegre edilebilir. Güç yoğunluğunun düşük olmasından dolayı 6 km'den sonra hasat edilen enerji miktarında önemli miktarda düşüş gözlemlenmektedir. Ama sistemin görev döngüsünde iyileştirme yapılırsa (%6-%8 altında) hasat edilen enerji kullanılabilir. RF-DC dönüşüm devrelerinde (-30 dBm'den -20 dBm'ye kadar) yaklaşık %10- %30

arasında dönüşüm verimliliğine sahiptir. RF ile yaklaşık 100  $\mu$ W güç ile 1.8- 4 V hasat edilebilmektedir. Hasat edilen bu güç ortalama bir algılayıcı düğümün enerji ihtiyacını belli bir süre karşılayacak seviyededir. Ortamın güç yoğunluğu ve anten kazancındaki artış hasat edilecek enerji miktarında artış gösterir. Doğrultucu devresinin girişine daha fazla güç verildiği zaman RF-DC dönüştürücünün verimliliği artmış olmaktadır [37-38]. RF sinyali ile gerçekleştirilen çalışmada National Instruments firmasına ait PXIe-1082 sinyal üretici 915 MHz sürekli dalga modunda 0 dBm ile 10 dBm arasında giriş sinyali uygulamıştır. Giriş sinyali koaksiyel kablo aracılığıyla P2110-EVB enerji hasatlama modülüne iletilmiştir. Gönderilen RF sinyali ölçülmüştür. En yüksek enerji hasadı 5 dB RF giriş sinyaliyle % 56.92 olarak hesaplanmıştır. En düşük seviye ise 0 dB giriş sinyaliyle çıkış verimi %45.60 olduğu gözlemlenmiştir. 0 dBm ile 10 dBm arasında uygulanan RF giriş sinyalinden yaklaşık olarak yarısının hasat edildiği gözlemlenmiştir [39]. [40]'ta kaynak olarak 1 W giriş gücüne sahip 915 MHz frekans bandında RFID okuyucunun kullanıldığı 4.3 m uzaklıktaki alıcıya RF sinyali gönderilmiştir. Sistemin aktif olması için ihtiyaç duyulan minimum güç duyarlılığı -8.7 dBm'dir. RF-DC dönüştürücünün çıkışına bağlanan 180 k $\Omega$ 'luk yük ile % 30'luk dönüşüm verimliliği elde edilmiştir. [41]'de kaynak olarak 3.2 W equivalent isotropic radiated power (EIRP) giriş gücüne sahip 866.5 MHz frekans bandında RFID okuyucunun kullanıldığı 4.8 m uzaklıktaki alıcıya RF sinyali gönderilmiştir. Sistemin aktif olması için ihtiyaç duyulan minimum güç duyarlılığı -14 dBm'dir. RF-DC dönüştürücünün çıkışına bağlanan 3 k $\Omega$ 'luk yük ile % 16'lık dönüşüm verimliliği ölçülmüştür. A.Dolgov ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, 1.96 GHz frekans bandında ortam hücrelerin kullanıldığı 50 m uzaklıktaki alıcıya RF sinyali gönderilmiştir. Sistemin aktif olması için ihtiyaç duyulan minimum güç duyarlılığı -15.2 dBm'dir. RF-DC dönüştürücünün çıkışına bağlanan 1 k $\Omega$ 'luk yük ile % 60'lık dönüşüm verimliliği hesaplanmıştır [42]. M.Pinuela ve arkadaşlarının çalışmalarında sırasıyla Dijital-TV, GSM900, GSM1800 ve 3G şehir merkezi kablosuz sinyallerinden 560MHz, 900MHz, 1.8GHz, 2.1GHz frekans bandında kaynak RF sinyali kullanılmıştır. Sistemin aktif olması için ihtiyaç duyulan minimum güç duyarlılığı -25 dBm'dir. RF-DC dönüştürücünün çıkışına bağlanan 100 $\mu$ F'lık yük ile % 40'lık dönüşüm verimliliği gözlemlenmiştir [43]. T.Ajmal ve arkadaşlarının yaptığı deneyde 150 kW giriş gücüne sahip 909 kHz düşük frekans bandında 20 km uzaklıktaki alıcıya kaynak RF sinyali kullanılmıştır. RF-DC dönüştürücünün çıkışına bağlanan 1 k $\Omega$ 'luk yük ile

yaklaşık % 50'lık dönüşüm verimliliği ölçülmüştür [44]. R.Shigeta ve arkadaşları, 380 kW (Tokyo) giriş gücüne sahip 540 MHz Dijital-TV frekans bandında 6.3 km uzaklıktaki alıcıya kaynak RF sinyali kullanılmıştır. Sistemin aktif olması için ihtiyaç duyulan minimum güç duyarlılığı -20 dBm'dir. RF-DC dönüştürücünün çıkışına bağlanan 50 k $\Omega$ 'luk yük ile -10 dBm'de yaklaşık % 30'lık dönüşüm verimliliği gözlemlenmiştir [45].

### **2.6.2 Piezoelektrik etki**

Piezoelektrik etkide akustik ses, rüzgar gibi mekanik bir hareket mevcut olduğu süre zarfında enerji hasadını gerçekleştirir. Anlaşılacağı üzere piezoelektrikte etki, titreşim gibi mekanik zorlanmalardan ortaya çıkan enerjiyi hasat etmektedir [46]. Piezoelektrik bir malzemenin çıkış gücü ortalama olarak 250  $\mu\text{w}/\text{cm}^3$ 'tür. Ama hareket kabiliyetindeki artış bu değeri daha da yukarıya çekebilir [47]. Piezoelektrik etkinin diğer enerji hasatlarına göre avantajlı olduğu yön, güç üreteçlerinin hacmi çok küçük olmasıdır. Ancak enerji hasadı için ihtiyaç duyulan mekanik hareketin, insan hareketi gibi düzensiz hareketler olmasından dolayı çıkış güç aralığı değişkenlik göstermektedir. Üretilen gücün yüksek voltaj, düşük akımlı olmasından dolayı düşük güç verimliliğine neden olmaktadır. Voltaj artışını sınırlamak için düzenleme devresine ihtiyaç duyulmaktadır [48].

### **2.6.3 Termal enerji**

Termal enerjinin ihtiyaç duyulduğu alanlar gün geçtikçe artış göstermektedir. Elektrik enerjisi termodinamik malzemede sıcaklık farkı Seebeck yada Thomson etkisi olarak ifade edilen etkinin termodinamik cihazlarda sıcaklık farkından elektrik enerjisinin elde edilmesidir. Termoelektrik jeneratörü 20-60  $\mu\text{w}/\text{cm}^2$ 'lik enerji üretebilmesi için ortalama 18-25 °C'lik insan vucüt sıcaklığı kullanılmalıdır. Termoelektrik cihazların diğer enerji hasadı cihazlardan öne çıkan yönü sıcaklık farkı veya ısı akışı olduğu sürece enerji üretmesidir. Ancak ağır ve sert bir yapıya sahip olması ise dezavantaj olarak görülmektedir [46].

### **2.6.4 Güneş enerjisi**

Güneş, termal, RF enerji, rüzgar ve titreşim en çok kullanılan ortam enerji kaynaklarıdır. Kullanılan bu çevresel enerji kaynakları içerisinde enerjinin yoğun olmasından dolayı güneş enerjisinin tercih edilebilirliği daha fazladır. Güneş enerjisi

mevsimsel, aylık, haftalık, günlük hatta gün içerisinde belli saat aralıklarında değişkenlik göstermektedir. Bu enerjiden daha verimli bir şekilde faydalanmak için ihtiyaç nispetinde bu periyotlarda geçmişte üretilen enerji miktarına bağlı olarak gelecekte üretilecek enerji miktarını hesaplayan algoritmalar geliştirilmiştir. Güneşten gelen enerjinin ihtiyaç duyulan elektrik enerjisine çevrilmesi foto-voltaik hücrelerin kullanımıyla yapılır [49]. Kablosuz güç transferi için yapılan çalışmalar 20. yy. başlarında daha elektrik güç şebekeleri kurulmadan yapılmıştır. Nikola Tesla ilk olarak elektrik sinyalini göndermeyi başarmıştır. Teslanın gerçekleştirmek istediği kablosuz güç transferinin hayata geçirilmemesinin önemli bir nedeni büyük elektrik alanın verimliliği düşürmesidir. Günümüzde kablosuz enerji iletimine olan ihtiyaçlar bu alanda ciddi oranda gelişme sağlanmıştır.



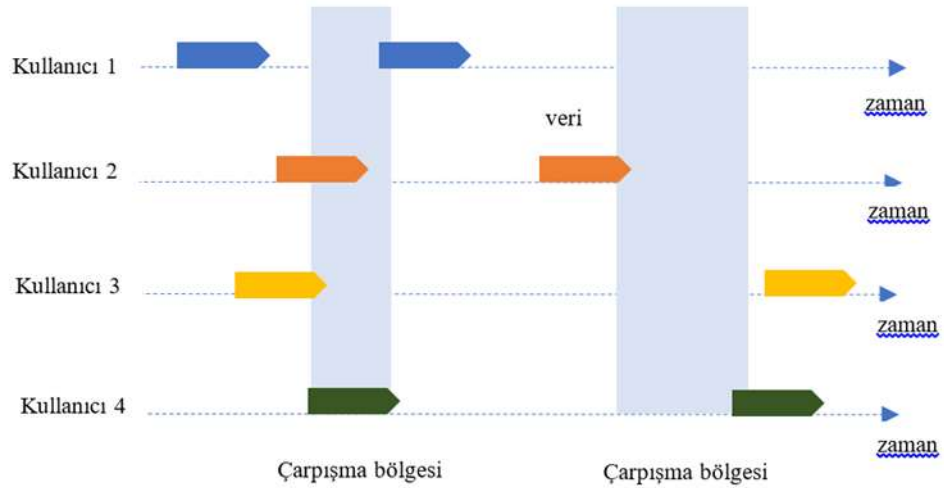
### 3. SİSTEM MODELLERİNİN TANIMI

#### 3.1 ALOHA Protokol Temelleri

ALOHA protokolü, 1970 yılında Hawaii Üniversitesindeki çalışmalar sonucu ortaya çıkan en eski ve en basit MAC protokolüdür. Haberleşme esnasında alınıp gönderilen bilgilere paket adı verilir. MAC protokollerinde asıl amaç paket iletiminin başarılı bir şekilde iletilmesini sağlamak, kanal verimini artırmak, çarpışma ihtimalini minimum seviyede tutmak, paket gecikme süresini azaltmak ve batarya enerji yönetimini gerçekleştirerek algılayıcı düğüm ömrünü mümkün olduğunca uzatmaktır. Algılayıcı düğümlerde paketin bozulmasına ve paketlerin tekrar gönderilmesine neden olan çarpışmanın minimum seviyede tutulması hayati bir önem taşımaktadır. Düşük verim ve yüksek gecikme ciddi oranda batarya tüketimine neden olmaktadır. Yukarıda ifade edilen problemleri çözmek için birçok MAC protokolü geliştirmiştir. Bu protokoller problemleri çözerek çalışma performansını yükseltmiştir. Ancak bu protokollerin tasarımı ile birlikte karmaşıklık ve ekstra bir yük sorunu ortaya çıkmıştır. Bazı alanlarda bu karmaşıklık ve ek yük ihtiyaç fazlası olarak görülmektedir. Karmaşıklığın azaltılması ek yükü azalttığı gibi aynı zamanda sade cihazların kullanılmasının önünü de açar. ALOHA hafif yüklü ağlar için kullanımı uygun olmasına rağmen bazı dezavantajları da beraberinde getirmektedir. ALOHA tabanlı protokoller güç ve hafıza kapasitesi sınırlı olan Kablosuz Kişisel Ağlar (Wireless Personal Networks (WPNs)) ve Radyo Frekans Tanımlama (Radio Frequency Identification (RFID)) gibi sistemlerde kullanılır. Çoklu erişimi gerçekleştirebilen protokollerden biri de ALOHA protokolüdür. Her kullanıcı aynı yayılma gecikmesine sahip olduğu varsayıldığından birden fazla kullanıcı aynı zaman diliminde paket gönderirse paketlerin çarpışması kaçınılmaz olur.

ALOHA protokolünde paket hazır olduğu gibi iletim gerçekleşir. Paket iletimi gerçekleşeceği zaman diğer algılayıcı düğümlerle herhangi bir koordinasyon yapılmadığı için başka bir algılayıcı düğümün aynı zaman diliminde paket iletimi yapıldığında paketler çarpışırlar. İletim esnasında paket çarpışması gerçekleştiğinde

çarpışan paketlerin ikisinde başarısız sayılır. Bu durumun artış göstermesi durumunda kanal veriminde büyük düşüş gözlemlenir. Şekil 3.1’de gösterildiği gibi iletim ortamında 4 adet kullanıcı bulunmaktadır. Her kullanıcının 2 paket göndermesiyle toplam kullanıcıların gönderdiği paket sayısı 8’dir. Çarpışma bölgesine giren paketler alıcıya ulaşmadan bozulur. Çarpışma bölgesinin dışındaki paketler hedefe ulaşmış kabul edilir. Çarpışma bölgesine paketlerin birer bitleri girmiş olsa bile paket tamamen bozulmuş olarak kabul edilir. Bozulan paketler yeniden gönderilir. ALOHA’da paketlerin başarılı bir şekilde alıcıya ulaştığını teyit etmek için alıcı tarafında vericiye ACK paketi gönderilir. Verici alıcıya paketi gönderdikten sonra alıcıdan ACK paketini belli bir süre bekler. Süre aşımı olduğunda, verici paketin çarpışma sonucu bozulduğunu veya paketin sağlıklı bir şekilde alıcıya ulaştığını onaylayan ACK paketinin çakıştığını kabul eder. Daha sonra verici alıcıya aynı paketi tekrar gönderir. Eğer vericiler tekrar aynı zaman diliminde paket gönderirse çakışma tekrar olur. Ortaya çıkan çarpışmanın azalması için paket gönderimi gerçekleşmeden  $T_p$  saniye önce ve  $T_p$  saniye sonra herhangi bir algılayıcı düğümün paket iletimini gerçekleştirmemesi gerekmektedir. Burada verilen  $T_p$  süresi bir paketin alıcıya ulaşması için gereken süredir.

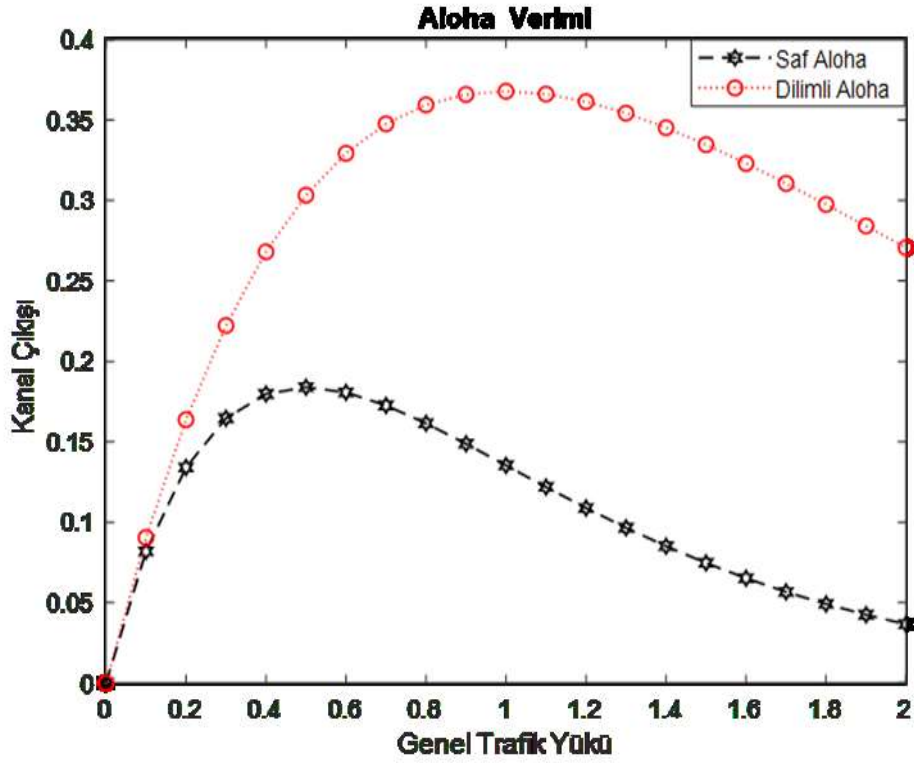


**Şekil 3.1 : ALOHA paket iletimi**

Kullanılan bu yöntemde eşitlik 3.1’de  $G=1/2$  ise kanal verimi %18 olur [50-52].

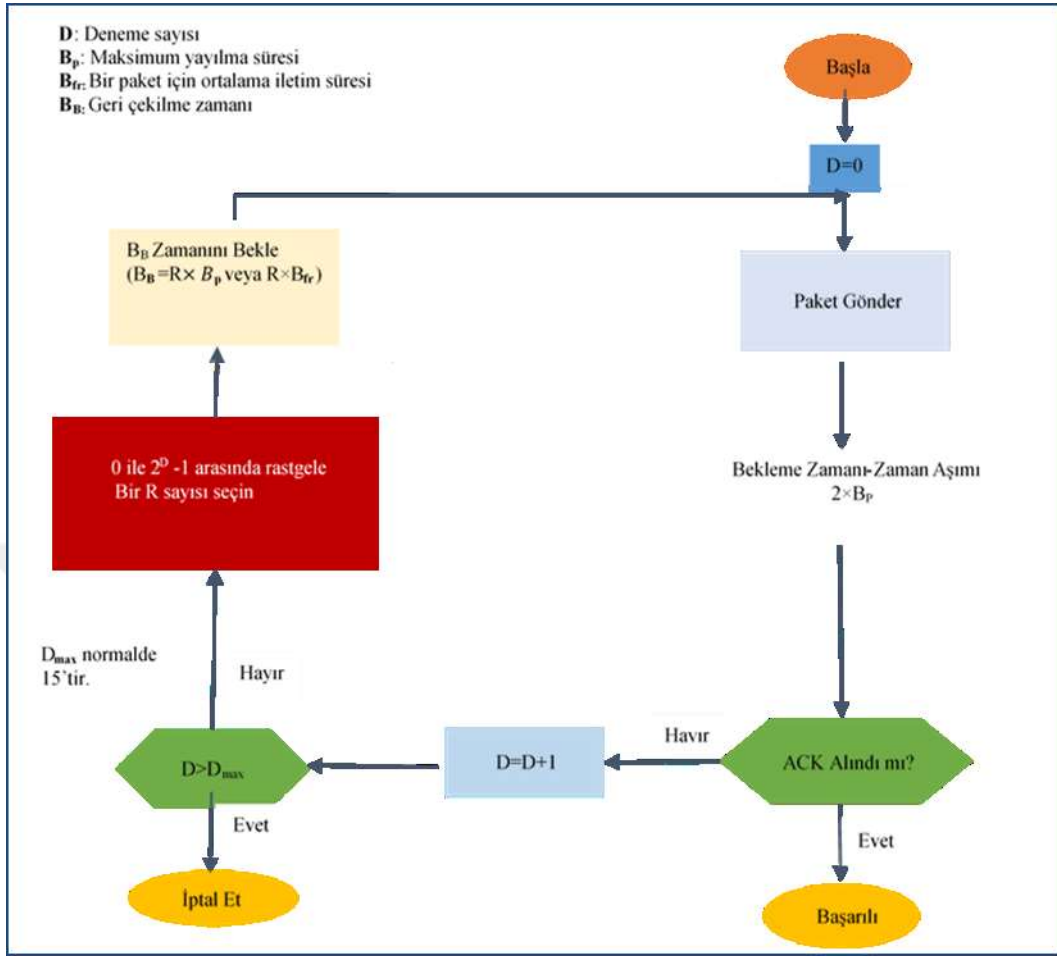
$$T=G*e^{-2G} = 1/2e \quad (3.1)$$

Burada verilen T verimi, G ise kanal trafiğini ifade etmektedir.



Şekil 3.2 : ALOHA ve Dilimli ALOHA'nın Teorik Verimi

ALOHA'da çarpışmanın minimum seviyeye düşürülmesi için geliştirilen ikinci metotta alıcıya ulaşmamış bir paketin belli ( $D_{max}$ ) sayıda tekrar gönderildikten sonra verici paket gönderme işlemini durdurur. Belli bir süre bekledikten sonra paket gönderme işlemini tekrardan başlatılır. Burada verilen  $D_{max}$  maksimum deneme sayısını göstermektedir.

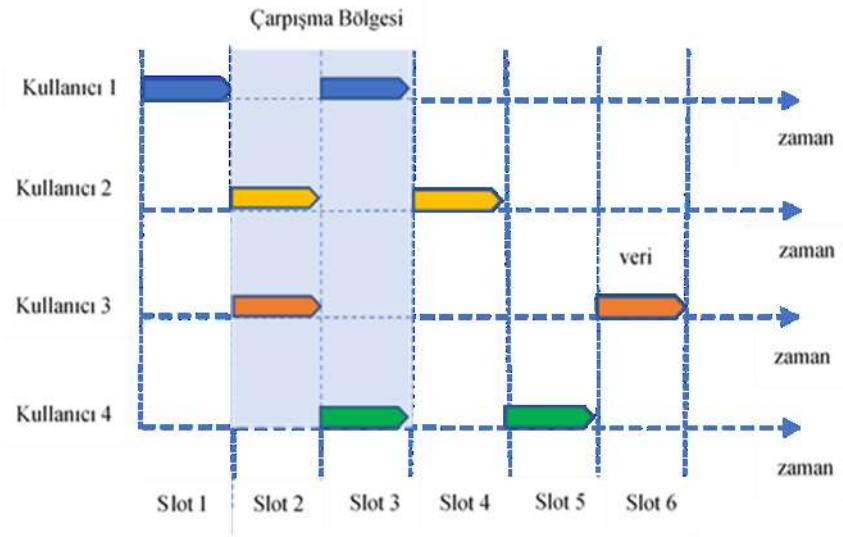


**Şekil 3.3 :** ALOHA’da akış diagramı

ALOHA’da vericinin paket gönderimini ne zaman gerçekleştireceği belli bir kural dahilinde değildir. Bu durum vericinin paket göndermek istediği zaman diliminin hemen öncesinde veya sonrasında başka vericinin paket gönderme ihtimalini ortaya koyar. Bu ihtimal aynı zaman diliminde gönderilen paketlerin çarpışmasına yol açar ve her iki paketin bozulmasına sebep olur. Bozulan paketler alıcıya iletilmez. Aynı zaman diliminde gönderilen verinin çarpışması sonucu ortaya çıkan problemi çözmek için Dilimli ALOHA yaklaşımı geliştirilmiştir. Dilimli ALOHA protokolünde zaman eksenini herbir algılayıcı düğüm için eşit zaman dilimine ayrılmıştır. Her algılayıcı düğüm kendisi için ayrılmış olan zaman diliminin başlangıcında paket iletimini gerçekleştirir. Dilimli ALOHA’da algılayıcı düğüm kendisi için ayrılmış olan zaman diliminde paket göndermezse tekrar paket gönderebilmesi için kendisine ayrılmış olan bir sonraki zaman dilimini beklemek zorundadır. Algılayıcı düğümler aynı dilimde paket gönderirse çarpışma olur. Dilimli

ALOHA küresel olarak senkronize edilebilir. Şekil 3.4'te 4 kullanıcının herbirini 2 paket gönderdiği ağda çarpışma bölgesine giren paketlerin hepsi alıcıya ulaşmadan bozulmuştur. Çarpışma bölgesi dışında kalan paketler alıcıya başarılı bir şekilde ulaştığı kabul edilir. Dilimli ALOHA'nın geliştirdiği bu yaklaşım sayesinde paket çarpışması azalmış ve kanal verimi artmıştır. Kullanılan bu yöntem ile eşitlik 3.2'de  $G=1$  ise kanal verimi %36 olduğu gözlemlenmektedir [52].

$$S=G*e^{-G} = 1/e \quad (3.2)$$



Şekil 3.4 : Dilimli ALOHA'da veri gönderimi

### 3.2 Q-Öğrenme Temelleri

Takviyeli Öğrenme (Reinforcement Learning) RL, karşılaşılan durumları algılayıp deneme yanılma yöntemiyle en doğru ve kısa yolu öğrenerek amaçlanan hedefi gerçekleştirir. Takviyeli Öğrenmede etmenin algıladığı bir durum karşısındaki tepkisi amaçlanan hedefe ulaşma noktasında olumsuz sonuç verirse etmen cezalandırılır. Ancak etmenin algılama sonucundaki pozisyonu hedefe ulaşmanın en iyi sonucunu veriyorsa ödüllendirme olur. Bu yaklaşımda çevre ile etkileşim halinde olan amaca ulaşmak için ödülü maksimum düzeye çıkarmaya çalışan etmen ajandır. Ajanın bulunduğu ortama göre aldığı pozisyona politika denir. Ödül, ajanın bulunduğu çevrede algıladığı olaya göre aldığı pozisyonun hedefe ulaşmak için ne kadar faydalı olup olmadığını öğrenip bir sonraki hareketi için kılavuz vazifesini görür. Ajanın

anlık hareketine karşılık aldığı ödül veya cezanın uzun vadedeki karşılığı durum değeridir.

Takviyeli öğrenme çatısı altında daha önce herhangi bir etiketleme olmadan bulunduğu şartlardan aldığı ödül ve cezaya göre en iyi aksiyonu yakalamak için Q-Öğrenme (Q-Learning) yaklaşımı geliştirilmiştir. Q-Öğrenme, mevcut politika dışında isteğe bağlı olarak aksiyon olarak öğrenmeyi gerçekleştirdiği için politika dışı olarak görülür. Q-Öğrenme, Bellman denklemini kullanarak bulunduğu ortamda alacağı ödülü tahmin ederek açgözlü politika dışında öğrenmeyi gerçekleştirir. Q-Öğrenmede ajan, daha önce herhangi bir bilgi olmadan çevresinden algıladığı aksiyonlardan öğrenmeyi gerçekleştirir. Ajan  $Q[S,A]$  tablosunda yer alan durumlar kümesi  $S$  ile eylemler kümesi  $A$ 'ya bakarak öğrenme işlemini yapar. Q-öğrenme algoritmasında ajan belli bir  $s$  durumunda yeni bir  $a$  eylemi gerçekleştirerek  $Q(s,a)$  tablosunu yeniler. Böylece  $Q$  tablosundaki  $s$  durumu ajanın aksiyonuna bağlı olarak değişen  $a$ 'ya göre yenilenir.

$$Q_{t+1}(s_t, a_t) = Q_t(s_t, a_t) + \alpha (r_t + \gamma \max_a Q_t(s_{t+1}, a_t) - Q_t(s_t, a_t)) \quad (3.3)$$

Formülde verilen  $r_t$ ,  $s_t$  durumundan  $s_{t+1}$  durumuna geçildiği zaman verilen ödül olarak ifade edilmektedir. Daha sonra gelecek olan  $s_{t+1}$  durumunda kullanılabilen  $a$  eylem değeri için maksimizasyon operatörü ve  $\alpha$ ,  $\gamma \in (0,1]$  ise sırasıyla öğrenme oranı ve azaltma faktörüdür. Öğrenme oranı, önceki değer ile yeni değer birbirleriyle olan uyumluluğu için kullanılırken azaltma faktörü ise sonra kazanılacak ödül ile mevcut zaman dilimindeki ödülün dengeli bir şekilde olması için kullanılmıştır. Yukarıda gösterilen Q-fonksiyonunda ajan, eylem seçim sürecinde çevredeki verileri algılamak için ortamı sömürmek yerine epsilonlu açgözlü bir yöntem tercih edilmiştir. Epsilon oranı, yöntemin kullanıldığı ilk zaman diliminde çevre algılama işlemi henüz yapılmadığından yüksek değerde olacağı ön görülür. Ajan süreç içerisinde isteğe bağlı olarak çevre ile etkileşime geçerek ortamı tanımaya başlar. Eylem seçim işlemi için Q-fonksiyonundan faydalanan ajan, çevreyi tanıdıkça daha önce yüksek olan epsilon oranı düşmeye başlar [53].

### 3.3 Geliştirilen Algılayıcı Düğüm

Ortam enerjili algılayıcı düğüm mimarisinde bulunan algılayıcı, işlemci, radyo alıcı-verici, ortam enerji üreticisi ve enerji depolama ünitesi bileşenlerinin bulunduğu bir algılayıcı düğüm kartı tasarlandı. Düğüm içinde bulunan işlemci için NodeMcu geliştirme kartı kullanıldı. NodeMCU üstünde bulunan ESP8266 WiFi modülü sayesinde internet ile kolay bir şekilde bağlantı kurulup IOT gibi birçok projede kullanım fırsatı oluşturur. NodeMCU açık kaynak kodlu ve C dilinin daha sade sürümü sayesinde kolay yazılım desteği sağlar [54]. Radyo alıcı-verici bileşeni için düşük maliyet ve güç tüketimi gibi özelliklere sahip 2.4 GHz frekans bandında çalışan hem alıcı hem de verici olarak haberleşebilen nRF24L01 kablosuz haberleşme çipi kullanıldı [55]. Ortam enerjisi olarak yoğunluğu ve sürekliliği açısından güneş enerjisi tercih edildi. Ortamdaki güneş enerjisini almak için 105x66mm'lik güneş paneli kullanıldı. Daha sonra güneş panelinden toplanan enerjiyi alıp Li-Po pilde depolanacak şekilde uygun şartları sağlayan devre elemanları yerleştirildi.



**Şekil 3.5 :** Sensor düğümünün tüm bileşenleri

nRF24L01 tarafında gönderilen pakette giriş, adres, paket kontrol alanı, yük, Cyclic Redundancy Check (CRC) alanları bulunur. Giriş alanı alıcının gelen paket ile

senkronizasyonu sadece 0 ve 1 sayılarından oluşur. Adres ve paket kontrol alanı ise kaynak, hedef kimliği, yük uzunluğu, paket tipi gibi bilgileri tutulduğu yerdir. Yük, 1-32 byte aralığında değişen ve vericilerin ortamdan algıladıkları bilgilerin yer aldığı kısımdır. Yük uzunluğunun sağladığı esneklik algılanan bilginin uzunluğuna göre belirlenip paket boyutunun ihtiyaç fazlası bir uzunlukta olmasının önüne geçmesini sağlar. CRC alınan paketin hata durumunu ele alarak sonuç olumsuz ise paketin alımı reddedilir.



Şekil 3.6: Filtreli paket formatı

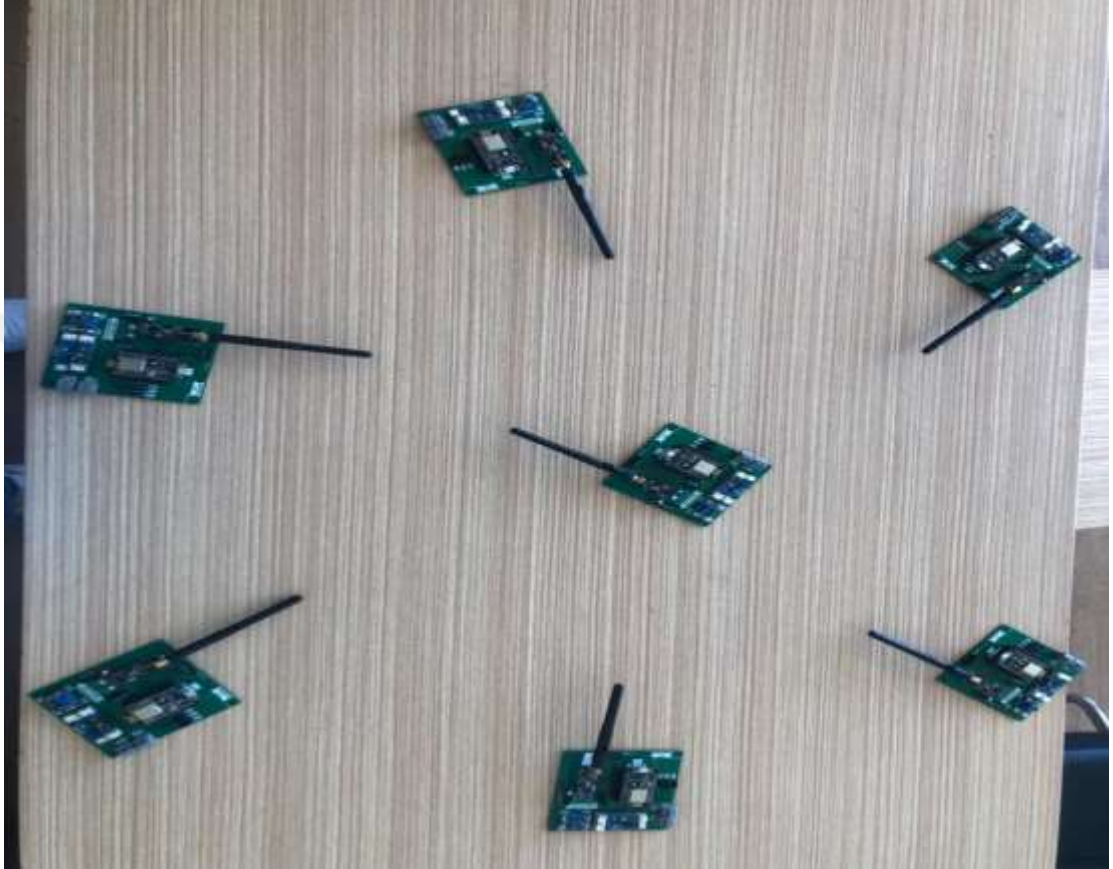
Yapılan çalışmada yük uzunluğu 32 byte olarak belirlenmiş ve paket gönderme hızı nRF24L01 için 2Mbit/s'ye kadar çıkabilirken alıcının gönderilen paketi daha sağlıklı bir şekilde alması için 250KBit/s olarak ayarlanmıştır. Düğümlerin birbirleriyle haberleşmesi için kullandıkları frekans aynı olmalıdır. Tek atlamalı senaryoda 6 adet verici ile 1 adet alıcı arasında görüş hattı iletişimiyle herhangi bir engel olmadan haberleşme gerçekleştirilir. Kanal verimi, kullanılan kanal kapasitesinin hangi oranda kullanıldığını ifade eder.

### 3.4 Tek-Atlamalı Senaryo Tasarımı

Şekil 3.7'de ALOHA protokolünün kanal performansını değerlendirmek için 6 verici ve bir alıcıdan oluşan tek atlamalı topoloji oluşturulmuştur. Yapılan çalışmada ALOHA protokolünün performans değerlendirilmesi yapılırken sensor düğümünün dış ortamdaki eşit olmayan mesafe, engel gibi birçok parametreleri göz ardı edilerek uygulanmıştır. Ancak yapılan uygulama ile ALOHA protokolünün kanal ve gecikme performansı temel performansa yakın değerler elde edilmiştir [2]. Alıcıdan eşit mesafe uzaklıkta bulunan verici düğümlerin iletim güçleri birbirleriyle aynı olmasının yanında alıcıda ise aynı girişim aralığı yer almaktadır. Paket gönderimi gerçekleşmeden önce düğümler verileri önceden belirlemiş oldukları özel iletim yuvasına iletir. Hazırlanan tüm paketler paket başlığının durumuna göre ilk giren ilk

çıkartma kuralına göre sıralanır. Paket kuyruk uzunluğu daha uygulanabilir olması ve sınırlı hafıza dolayısıyla 10 olarak belirlenmiştir. Paket kuyruğu dolduğunda oluşturulan herhangi bir paket otomatik olarak hafızadan atılır.

### 3.5 Yakalama Etkisi Temelleri



**Şekil 3.7 :** Altı verici ve bir alıcıda oluşan tek atlamalı topoloji

Bu çalışmada ALOHA'nın verim performansı hem teorik hem de pratik olarak araştırıldı. Yapılan protokol çalışmalarında alıcı kanala eş zamanlı olarak birden fazla paket verici tarafından gönderildiği zaman paket çarpışması meydana gelmektedir. Aynı anda paket iletimi gerçekleştiği zaman gerçekleşen çarpışma paketin tamamen yada bir kısmının bozulup alıcıya başarılı bir şekilde ulaşmasına engel olabilmektedir. Paket çarpışmaları şekil 3.8'de gösterildiği gibi farklı durumlarda gerçekleşebilir.

Paket 1

Paket 2

a) Tamamen örtüşen

Paket 1

Paket 2

b) Kısmen örtüşen

Paket 1

Paket 2

Paket 3

c) Çarpışmaya dahil olan 3-paket

Paket 1

Paket 3

Paket 2

Paket 4

d) Ardışık paket çarpışmaları

**Şekil 3.8** : Bazı paket çarpışma örnekleri

Yakalama etkisi eş zamanlı olarak birden fazla verici tarafından gönderilen paketlerin alıcı tarafından paketin doğru bir şekilde alınabilmesidir. Yakalama etkisi ile en güçlü vericiden paketlerin alımı başarılı bir şekilde gerçekleşir. Verici tarafından gönderilen paketin gücü eşzamanlı olarak gönderilen diğer paketlerin gücünden büyük ise yakalama etkisi sayesinde alınan paketin kodu çözülebilir. Yani sinyalin “signal-to-interference-plus-noise-ratio” sinyal-girişim-artı-gürültü-oran SINR değeri eşik değerinin üstünde ise paket alınma işlemi başarılı bir şekilde gerçekleşir. Yakalama etkisi üzerine yapılan çalışmaların çoğunda iki durumdan

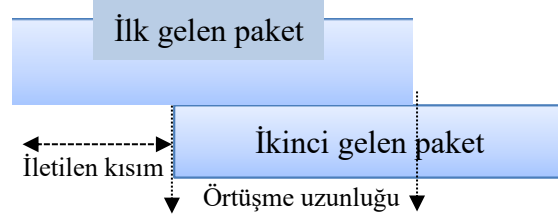
birisinde iki örtüşen paketin olduğunu varsayar. Güçlü paketin ilk olarak alındığı birinci durumda radyo alıcı-vericisi güçlü paket ile senkronize olur ve paketin başarılı bir şekilde alınma işlemi güç seviyesinin yeterli düzeyde olduğu zaman zarfında devam eder. Güç seviyesinin daha düşük olan paketin ilk olarak alındığı ikinci durumda ise radyo alıcı-vericisi zayıf olan paket ile senkronize olunur ve paket alımı güçlü paketin zayıf paketi bozması sonucu başarısızlıkla sonuçlanır. Şekil 3.9'da olası yakalama durumları gösterilmiştir [56-57].



**Şekil 3.9 : Genel yakalama durumları**

### **3.6 ALOHA ve Yakalama Etkisi**

Yapılan teorik çalışmalarda eş zamanlı olarak iletilen paketlerin çarpıştığı ve tamamen bozulduğu kabul edilmiştir. Ancak son zamanlarda uygulamalı paket iletimlerinde eş zamanlı paket iletimi gerçekleşirken paket örtüşme uzunluğuna göre paket alımında başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum yakalama etkisi olarak ifade edilmektedir. Yakalama etkisinin ortaya çıkardığı bu avantajlı durumun gerçekleşmesi eş zamanlı olarak iletilen paketlerden ilk gelen paketin örtüşme uzunluğuna bağlı olarak bozulmadan alınmasıyla gerçekleşir. Şekil 3.10'da iki paketin yakalama senaryosu gösterilmiştir.



**Şekil 3.10** : 2 paket yakalama senaryosunun bir örneği.

Radyo alıcı-vericisi ilk gelen paket ile hemen senkronize olurken, ilk paketin gelmesinden hemen sonra gelen ikinci paket çarpışma meydana getirir. Bu durum alıcıya ulaşan ilk paketin ikinci paket ile örtüştüğü kısma kadar başarılı bir şekilde alınmasına ve örtüşen uzunluğun her iki paketin bozulmasıyla sonuçlanmaktadır. Ortaya çıkan bu sonuçlar özellikle eşit güç iletimine sahip ALOHA ağında etkili sonuçlar verdiği görülmüştür. Daha önce yapılan çalışmalarda yakalama etkisinin olma ihtimali modellenerek ALOHA'daki yakalama etkisi uygulamalı olarak hesaplanmıştır. Çarpışmalarda paket alım hızı ile ilişkili olan yakalama katsayısı çıkartılır. Yakalama olasılığı ve yakalama katsayısı çarpılarak ALOHA'nın kanal verimine katkısını görmek için matematiksel formül olarak kullanılmıştır. Binom dağılımı kullanarak sınırlı kullanıcının olduğu ALOHA ağı için kanal verimi aşağıda verilen eşitlik ile ifade edilmiştir.

$$np(1-p)^{2(n-1)} + n(n-1)p^2 \left( \frac{(1-p)^{2(n-2)}}{2} + (1-p)^{2n-3} \right) C_{n2} \quad (3.4)$$

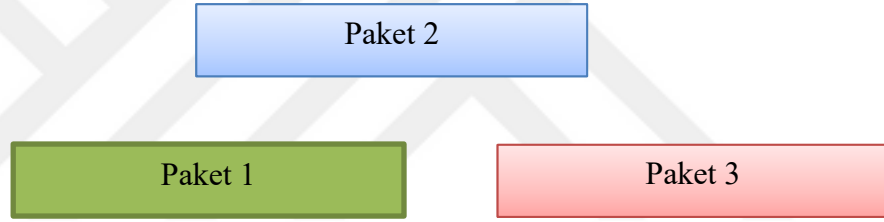
←————→
←————→

Yakalama etkisi  
olmadan ALOHA
2-paket yakalama

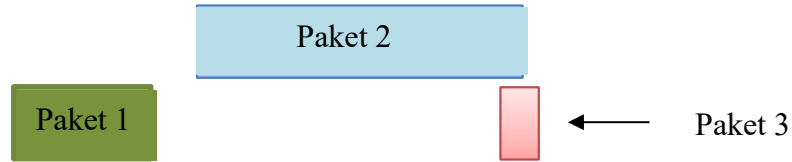
Formülde verilen  $n$  kullanıcı sayısı,  $p$  bir kullanıcının her paket için eşdeğer paket iletme olasılığıdır ve  $C_{n2}$ , 2 paketin çarpışmasından yakalama katsayısını ifade etmektedir. Yapılan çalışmadaki deneysel kurulum, yakalama katsayısının hesaba katılması için gerekli ayarlamaları yapılmıştır. 6 verici kullanılarak ve radyo alıcı-vericisinin (NRF24L01) maksimum paket boyutu ile yakalama katsayısı ( $C_{n2}$ ) hesaplanmıştır. Çalışmanın bundan sonraki kısmı için ALOHA ile yakalama etkisi (ALOHA with Capture) ALOHA-C olarak gösterilecektir.

### 3.7 ALOHA ve Dinamik Veri Uzunluğu

ALOHA kanal veriminin hesabı yapılırken genel uygulamalarda paket uzunluğu tüm verici düğümlerde sabit olarak ayarlanmaktadır. ALOHA'da iletilen paketin sabit ve eşit uzunlukta olması belirli paket oluşturma hızıyla kanal veriminin analiz edilmesinde uygun olur. ALOHA'da kanal veriminin düşük değerlerde çıkmasının ana nedenlerinden biri paketlerin örtüştüğü bölgede paketin bozulmasından kaynaklanmaktadır. ALOHA'nın paket iletiminde temel dezavantajlardan biri olan eşit uzunlukta paket üretiminin yapılması paketlerin kısmen ya da tamamen bozulmasına yol açmasıdır. İki paketin örtüşme olduğu baytların toplam sayısı tekdüze paylaşmış olarak görülür. Paketlerin örtüşme ihtimalini azaltmak için yüklerin uzunluğunu dinamik olarak ayarlanması amaçlanmaktadır. Hedeflenen amaca ulaşmak için paket iletimi başlangıcında yük uzunluğu azaltılır. Yük uzunluğunun dinamik olarak seçilmesi Şekil 3.11'de gösterilmiştir.



(a) Eşit uzunlukta üst üste binen üç paket.



(b) Dinamik yüke sahip örtüşen üç paket.

**Şekil 3.11:** Paket çarpışması örneği: (a) Sabit yük boyutu ile ve (b) Değişken yük boyutu ile

Şekil 3.11 a'da yük uzunlukları eşit olan üç paketlerin çarpıştığı ve tümünün bozulma ihtimalini artırdığı gözlemlenmiştir. Şekil 3.11 b'de ise paket uzunluğu dinamik olarak ayarlanmış olup örtüşmeye maruz kalmayan ilk paketin başarılı bir şekilde alınma olasılığının arttığı tespit edilmiştir. Bununla beraber ikinci paketin üçüncü paket ile örtüşme alanının çok küçük olması ikinci paketin kısmen başarılı bir şekilde alınmasının önünü açmaktadır. Yapılan bu çalışmanın ortaya koyduğu katkının, yük uzunluğunun değişmesi kanal veriminin artışı ile sonuçlandığı

söylenbilir. Yapılan çalışma sonucunda yükün dinamik olarak 1 bayttan maksimum uzunluğa kadar ihtiyaç nispetinde seçilip kanal veriminin düşük değerlerde olmasının temel nedenlerinden biri olan paket çarpışmaları için kısmi bir iyileştirme yapılmıştır.

### 3.8 IoT ve Q-Öğrenme ile ALOHA

Bu bölümde P-ALOHA için IoT'nin kullanılmasından kaynaklı olarak kanal veriminin artış gösterdiği görülmüştür. Oluşturulan bu tasarım sayesinde internet aracılığıyla paket iletimi gerçekleştirildiği için kanal verimi ciddi oranda artış gösterirken KAA'lar için temel problemlerden olan sınırlı kapasiteye sahip bataryanın enerji tüketimi IoT modülünün geleneksel alıcı-verici modüllerde daha fazla enerji tüketiminden dolayı daha hızlı tükendiği sonucu elde edilmiştir. Sınırlı kapasiteye sahip ve batarya değişiminin pek mümkün olmadığı KAA ağlar için IoT modülünün sürekli kullanılmasından kaynaklı ortaya çıkan bu problemi paket iletimini bazı aralıklarda göndermek daha makul bir yaklaşım olacaktır. Nesnenin paket iletiminin hangi aralıklarda gerçekleştireceğine nesnelerin geçmişte iletim yaptığı duruma bakarak karar verecek algoritma oluşturulmalıdır. Bu yaklaşımın temel prensibi paket çarpışmalarının yoğun olduğu aralıklarda internet üzerinde transferin gerçekleşmesidir. Etkili bir karar sürecini desteklemek için, internet veya Radyo modülü gibi iletim seçeneklerinin arzu edilebilirlik seviyesini sayısal olarak belirtmek için Q-Öğrenme algoritmasının basit bir durumsuz versiyonu kullanılır. Her nesne, aşağıda tanımlanan iletimlerden sonra yeniden güncellenecek bir Q değeri tutar.

$$Q=Q+\alpha(R-Q) \quad (3.5)$$

Burada R, aktarım sonucuna bağlı olarak iki değer alan ödül fonksiyonudur. R değeri, eğer başarılı olursa +1 değerini alırken başarısız olunca ise -1 değerini alır. Denklemden verilen  $\alpha$  parametresi öğrenme hızını ifade etmektedir. Literatürde, yapılan uygulamalarda seçilen R ve  $\alpha$  sayısal değerlerinin seçimi için üzerinde anlaşmaya varılmış bir fikir birliği yoktur. Q değeri öncelikle her nesne için başlangıçta 1 olarak ayarlanıp daha sonra ise her başarısız iletim için 0'a yaklaşır. Temelde, bu stratejide, nesnelere 1-Q olasılıkla internet üzerinden paket göndermeyi kararlaştırırlar. Bundan dolayı, nesnelerin internet üzerinde paket iletimi ilk başta 0

olarak ayarlanır. KAA'da paket iletiminde çarpışmalar meydana gelirken  $Q$  değerinde azalma olacak ve internet üzerinden paket iletim için  $1-Q$  olasılığı tahsis edilecektir. Bundan dolayı internet üzerinden paket iletimi nesnenin iletim başarısızlığı olarak belirlenir. Tezin bundan sonraki kısmında IoT özelliğe sahip ALOHA, IoT-ALOHA olarak ifade edilecektir.

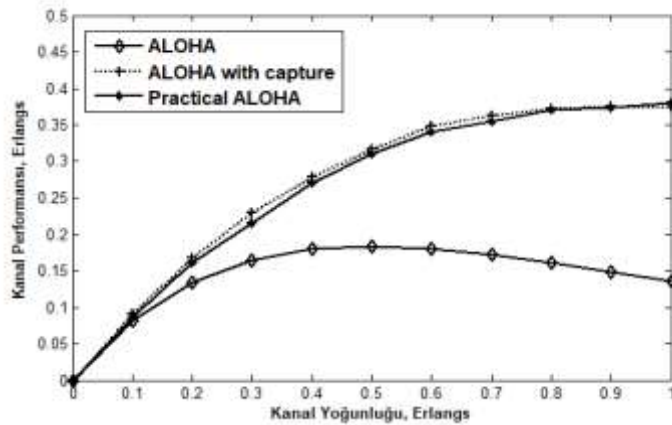


#### 4. PERFORMANS ANALİZİ

Bu bölümde elde edilen performans analiz sonuçları  $10^6$  slotluk deney süresi ile gerçekleştirildi. Sunulan herbir yaklaşımı 100 defa çalıştırıp daha sonra ortalamasını alarak sonuçlar elde edilmiştir. Performans analizinde, kanal kapasitesinin Erlang birimi cinsinden kullanıldığı miktarı belirleyen kanal verimi ile paketin verici tarafından üretilip alıcıya başarılı bir şekilde iletilmesi için geçen süreyi ifade eden gecikme süresini ele almıştır. Gönderilen tüm paketlerin ortalama süresi alınarak gecikme süresi hesaplanmıştır.

##### 4.1 ALOHA Kanal Performans Analizi

Yapılan ilk çalışmada ALOHA, ALOHA-C VE P-ALOHA'nın kanal verimini Erlang birimi türünden trafik yükünü 0.1'den başlatarak 0.1 adımlarla 1'e kadar olan kapasite ile gösterilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada paketlerin alıcıya başarılı bir şekilde iletilmesini vericiye ileten ACK onay mesajı olmadan pratik uygulamalar için P-ALOHA'nın kanal verimi ölçülmüştür. P-ALOHA kanal verimi hesaplanması ACK onay mesajı ve yeniden paket iletimi olmadan uygulanmıştır. Verici tarafında iletilen paketin alıcıya ulaşması başarısız olduğunda 7 defaya kadar tekrar gönderilmesi trafik yükünün artmasına yol açarken trafik yükünün artması ise paket çarpışmasına ve enerjinin fazladan tüketilmesine sebep olmaktadır.



Şekil 4.1 : ALOHA, ALOHA with capture ve Practical ALOHA verim grafiği

Bu yaklaşımla trafik yükünün az olmasından dolayı çarpışma olasılığının azalmış olması avantajını sağlarken ancak iletilen paketin durumu hakkında vericiye geri bir dönüşün olmaması dezavantaj olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yaklaşımda asıl amaç Şekil 4.1’de gösterildiği gibi ACK onay mesajı olmadan ALOHA’nın kanal verim karakteristiğini ortaya koymaktır. ALOHA ve ALOHA-C için kanal verimi önceki bölümlerde analitik hesapla gösterilmiştir. Yapılan uygulama sonucunda oluşturulan trafik 1 Erlang olduğunda P-ALOHA’nın 0.38 kanal performansı ile ALOHA’nın kanal performansında daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. P-ALOHA’nın, ALOHA’nın aksine trafik yükü 1 Erlang’a yaklaştıkça kanal performansının yükseldiği görülmüştür. Bununla beraber P-ALOHA’nın pratik sonuçları ile ALOHA-C’nin analitik sonuçlarının kanal performans eğrisi birbirlerine çok yakın olduğu sonucu elde edilmiştir. Uygulama sonucunda ALOHA için genel bir formülasyonla net bir sonucun elde edilemeyeceği bu durumun yapılan tasarıma göre değişkenlik göstereceği sonucuna varılmıştır.

#### **4.2 Farklı İletim Güçleri için Kanal Performansı**

Bu bölümde yapılan çalışmada, 6 adet verici ve bir alıcı tarafından oluşturulan tek atlamalı KAA’da kanal trafik yükü 0.1 Erlang’dan başlamak üzere her bir vericinin paket iletim gücü sırasıyla maksimum yapıp kanal verimi ölçülmüştür. Örnek verecek olursak oluşturulan kanal trafik yoğunluğu 1 Erlang olduğunda 6 farklı senaryodan ikincisinde, 2 adet vericinin iletim gücü maksimum iken geriye kalan diğer 4 adet vericinin iletim gücü minimum seviyede tutulmuştur. Bu senaryoda kanal verimi 0.42 olarak ölçülmüşken tüm vericilerin iletim gücünün minimum olduğu durumda ise kanal verimi 0.38 olarak kaydedilmiştir. Bu çalışma sonucunda maksimum güç ile iletim gerçekleştiği zaman kanal veriminin arttığı söylenebilir. Kanal verimindeki artışın ana sebeplerinden birincisi maksimum güç ile iletim yapılması paketin alıcı tarafından alınma olasılığını artırır. İkinci sebep ise maksimum güç ile iletim, paketin bozulma ihtimalini azaltmasından kaynaklanmaktadır. Ancak maksimum güç ile iletimin dezavantajı KAA’lar için temel problemlerden olan sınırlı kapasiteye sahip bataryanın enerjisinin daha hızlı bitmesinin önünü açmasıdır.

**Çizelge 4.1 : Practical ALOHA’da MAX iletim gücüne göre kanal performansı**

MAX iletim düğüm sayısı	güçte yapan	Kanal Yoğunluğu									
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
1		0.0858	0.1590	0.2169	0.2613	0.3053	0.3221	0.3529	0.3788	0.3920	0.4140
2		0.0830	0.1574	0.2168	0.2679	0.3074	0.3332	0.3665	0.3945	0.3901	0.4256
3		0.0839	0.1577	0.2174	0.2722	0.3078	0.3433	0.3634	0.3803	0.4025	0.4153
4		0.0673	0.1285	0.1791	0.2201	0.2496	0.3225	0.3621	0.3828	0.4035	0.4110
5		0.0678	0.1309	0.1792	0.2155	0.2510	0.3286	0.3629	0.3850	0.3980	0.4139
6		0.0633	0.1302	0.1801	0.2169	0.2500	0.3256	0.3638	0.3778	0.3830	0.4177
<b>ALOHA</b>		<b>0.0866</b>	<b>0.1610</b>	<b>0.2158</b>	<b>0.2702</b>	<b>0.3110</b>	<b>0.3407</b>	<b>0.3549</b>	<b>0.3710</b>	<b>0.3739</b>	<b>0.3806</b>

### 4.3 ALOHA ve Dinamik Veri Uzunluğu

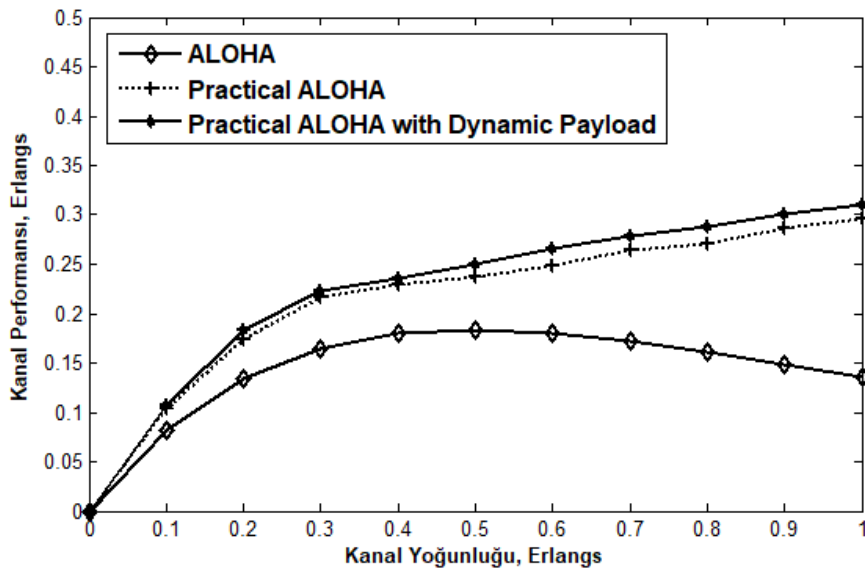
Bu kısımda ise oluşturulan trafik değerinin artırılmasıyla birlikte yük uzunluğunu dinamik veri uzunluğu ile 5-baytlık olarak artırıp kanal verimi hesaplanmıştır. Çizelge 4.2’deki veriler dinamik veri uzunluğu yakalaşımının ALOHA için elde edilen sonuçlardan her zaman daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Yükün kanal verimi üzerindeki etkisini tespit etmek için yük veri uzunluğunu 1 bayttan başlayarak beşin katları olarak artırıp kanal performans sonuçları elde edilmiştir. Yük uzunluğu 1-32 bayt olduğu zaman ile radyo alıcı-vericisi tarafında oluşturulan maksimum paket boyutları eşittir. Maksimum yük boyutu ile kanal verimliliğinin maksimum seviyede olduğu gözlemlenmiştir. Kanal veriminin düşük yük uzunluğunda daha az verime sahip olmasının nedeni paket boyutu yüksek olan paketlerle çarpışıp kaybolmasından kaynaklanmaktadır. P-ALOHA’da büyük paketlerle çarpışıp kaybolan küçük boyuttaki yük uzunluğunu artırarak daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Kanal performansı yük uzunluğu 15 bayta kadar sürekli artış gösterirken sonrasında ise azalma olmuştur. 1 Erlang trafik yükünde dinamik yük uzunluğu 15-32 bayt olduğunda kanal verimi 0.47 gibi yüksek bir değerde hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar dinamik yük uzunluğu ALOHA protokolünde performans artışı için önemli bir yol olarak kullanılacağı kanaatını oluşturmuştur.

**Çizelge 4.1 : Practical ALOHA’da Dynmic Payload ile kanal performansı**

Veri aralığı	uzunluk	Kanal Yoğunluğu									
		0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0
1-32		0.0893	0.1635	0.2192	0.2660	0.3055	0.3343	0.3448	0.3704	0.4163	0.4175
5-32		0.0950	0.1721	0.2301	0.2827	0.3071	0.3486	0.3696	0.3973	0.4210	0.4383
10-32		0.0963	0.1775	0.2433	0.2876	0.3185	0.3708	0.3887	0.4237	0.4386	0.4645
15-32		0.0979	0.1808	0.2525	0.2995	0.3330	0.3698	0.3860	0.4365	0.4367	0.4728
20-32		0.0962	0.1789	0.2482	0.3066	0.3406	0.3689	0.3867	0.4315	0.4418	0.4696
<b>ALOHA</b>		<b>0.0866</b>	<b>0.1610</b>	<b>0.2158</b>	<b>0.2702</b>	<b>0.3110</b>	<b>0.3407</b>	<b>0.3549</b>	<b>0.3710</b>	<b>0.3739</b>	<b>0.3806</b>

#### 4.4 Onay Mesajı ile ALOHA Kanal Performansı

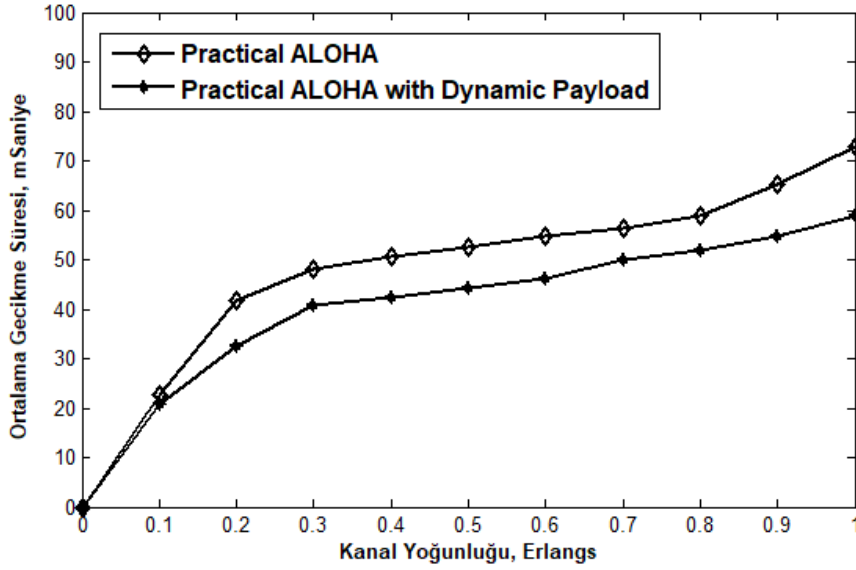
ALOHA protokolünde verici tarafından gönderilen paketin alıcı tarafında başarılı bir şekilde alındığını gösteren ACK onay mesajı ağ ortamının daha kolay bir şekilde kontrol edilmesini sağlarken ACK onay mesajının karşılıklı olarak gönderilmesi aynı zamanda trafik yükünü artırmaktadır. Bu bölümde ACK onay mesajı ile P-ALOHA'nın kanal verimi ve gecikme durumundaki değişim incelenecektir. Şekil 4.2'de gösterildiği gibi P-ALOHA, ALOHA'ya göre kanal verimi sürekli olarak artarken, P-ALOHA ve dinamik yük ile paket boyutu değiştirilen P-ALOHA yakın bir kanal verim eğrisi göstermektedir.



Şekil 4.2 : ALOHA, ALOHA with capture ve Practical ALOHA'nın ACK alınarak verim grafiği

Ancak dinamik yük ile paket boyutu değiştirilen P-ALOHA bir önceki kısımda açıklanan işleyiş sayesinde kanal verimi kısmen daha yüksek olduğu görülmektedir. Her iki yaklaşımın bir önceki kanal verimi sırasıyla 0.38 ve 0.47 Erlang iken ACK onay mesajı mekanizmaya dâhil edildiğinde 1 Erlang trafikte 0.29 ve 0.31 olarak karşımıza çıkmaktadır. Bir önceki duruma göre kanal veriminin düşmesinin nedeni, verici tarafından gönderilen paketin alıcı tarafından alındığını teyit eden ACK mesajı vericiye ulaşmadığı zaman verici otomatik olarak paketin alıcıya ulaşmadığını varsayarak paket iletimini tekrarlar. Bu durum ağ ortamında gönderilen paket sayısını artırması sonucunda paket çarpışma olasılığını beraberinde getirir. Şekil 4.3'te P-ALOHA ve dinamik yük ayarlanan P-ALOHA'nın gecikme performansı ölçülmüştür. Trafik yükü 0.1 Erlang olduğu zaman paket iletimi gerçekleşirken

kuyrukta bekleme çok fazla olmadığı için her iki yaklaşımın yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Trafik yükü artırdıkça her iki protokol paket iletimini ertelemek zorunda kalır ve kuyrukta bekletilmeye başlanır. Ancak kuyrukta bekletilecek paket sayısının sınırlı oluşu fazla paketlerin iletilmeden bozulmasına yol açacaktır. Dinamik yük özelliğine sahip P-ALOHA'nın paket iletimini daha hızlı gerçekleştirdiği için gecikme performansı daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.

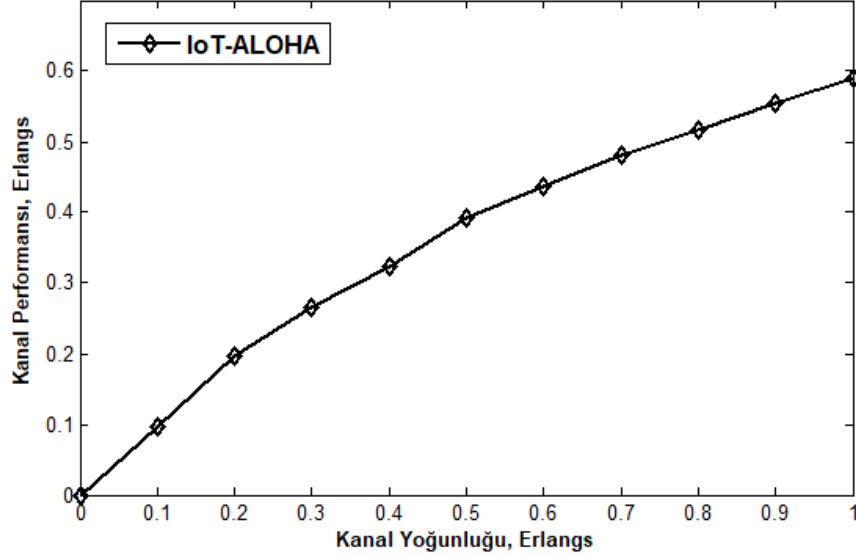


Şekil 4.3 : Practical ALOHA ve Practical ALOHA with Dynamic Payload gecikme performansı

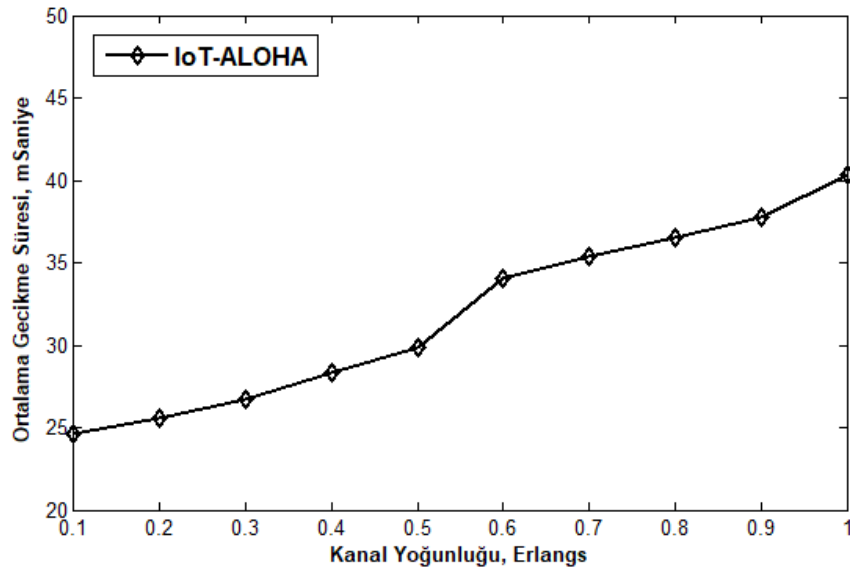
#### 4.5 Q-Öğrenme Tabanlı ALOHA Kanal Performansı

Bu kısımda şekil 4.4'te gösterildiği gibi IoT-ALOHA'nın kanal performansının artan trafik yüküne göre paket alım hızının yüksek olmasından kaynaklı olarak arttığı görülmüştür. IoT-ALOHA, 0.6 Erlang'da maksimum kanal verimi olan P-ALOHA'ya göre çok daha iyi sonuç verdiği belirlenmiştir. Trafik yükünün fazla olduğu durumlarda IoT-ALOHA internet aracılığıyla paket iletimini gerçekleştirdiği için P-ALOHA'ya göre %50 gibi yüksek bir yüzde başarıyı kaydetmiştir. Şekil 4.5'te IoT-ALOHA için gecikme performansı ölçümü yapılmıştır. IoT-ALOHA'nın gecikme performansının düşük trafik yüklerinde P-ALOHA'ya yakın olmasının nedeni internet kullanımına ihtiyaç olmamasından kaynaklanmaktadır. Ancak trafik yükünü arttırdığımızda IoT-ALOHA internet kullanmasından dolayı paketlerin kuyrukta bekleme süresi kısaldığı için paketlerin gecikmesi süresinde doğru orantılı olarak azalmıştır. Sonucu rakamsal olarak ifade edecek olursak 1 Erlang trafik

yükünde IoT- ALOHA'nın ortalama gecikme süresi 40ms iken dinamik yük özelliğine sahip P-ALOHA'nın gecikme süresi 70 ms ve 60 ms üzerinde ölçülmüştür.



Şekil 4.4 : IoT-ALOHA'nın Kanal Performansı

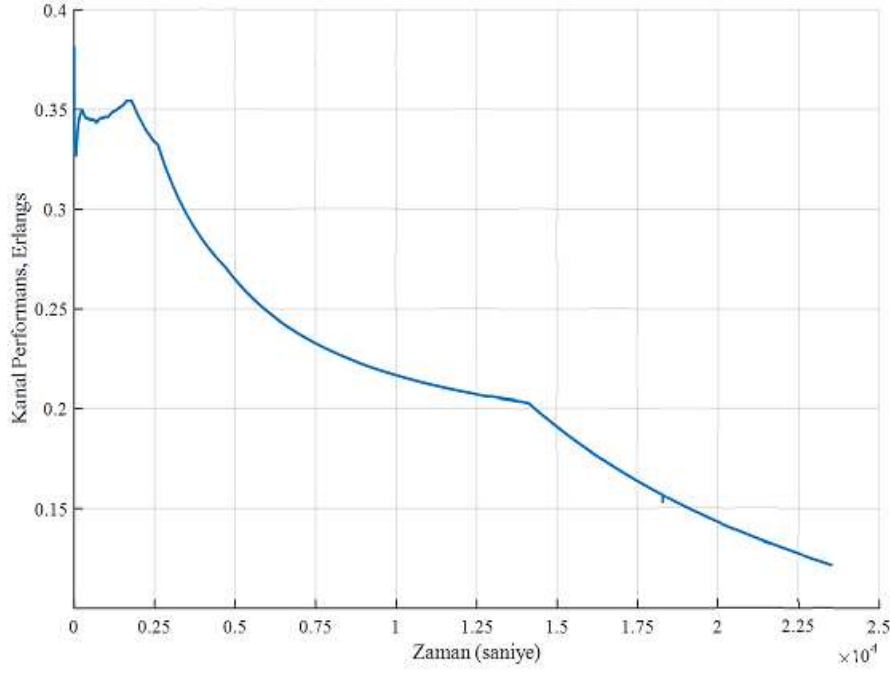


Şekil 4.5 : IoT-ALOHA'nın gecikme performansı

#### 4.6 Güneş Enerjisi ile Bataryanın Şarj Edilip Paket İletimi Gerçekleştirilmesi

Değişiminin pek mümkün olmadığı, sınırlı kapasiteye sahip bataryanın enerjisini sürekli hale getirmeye çalışmak KAA'da temel problemlerden biridir. Varolan bu sorunu çözmek için ortam enerjisi kullanılmaya başlanmıştır. Tez çalışmamızda,

güneş enerjisiyle sensor düğümümüzün bataryasını şarj edip paket gönderimi yapılmıştır. Uygulamada, 6 adet vericinin güneş enerjisi sayesinde maksimum seviyede şarj olmuş bataryaları ile alıcıya toplam 23535 saniye boyunca paket akışı olduğu gözlemlenmiştir. Vericilerden ilk başta gelen paketleri toplam kanal verimi 0.4389 iken 23525 saniye sonra toplam kanal verim Şekil 4.6'da görüldüğü üzere 0.1216 olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.6 : Bataryaya güneş panelinden alınan enerji verim değişimi

## KAYNAKLAR

- [1] **Akyildiz I.F, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, Cayirci E.** (2002). Wireless sensor networks: a survey, *Computer Networks*, (38), 393–422.
- [2] **Moschitta A., Neri I.** (2014). Power consumption Assessment in Wireless Sensor Networks, <http://dx.doi.org/10.5772/57201>.
- [3] **BAYRAKDAR, M. E.** (2020). Kablosuz Algılayıcı Ağlar için Gecikme Duyarlı CSMA Ortam Erişim Tekniğinin Performans Değerlendirmesi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 12(1), 227-235.
- [4] **Kosunalp, S.** (2016). A new energy prediction algorithm for energy-harvesting wireless sensor networks with Q-learning. *IEEE Access*, 4, 5755-5763.
- [5] **Koşunalp, S. & Tabakcioğlu, M. B.** (2016, May). Medium access control protocols for wireless sensor networks with ambient energy. In 2016 24th Signal Processing and Communication Application Conference (SIU) (pp. 641-644). IEEE.
- [6] **Warneke B., Liebowitz B., Pister K.S.J.** (2001). Smart dust: communicating with a cubic-millimeter computer, *IEEE Computer*, 34 (1) , Ocak.
- [7] **Heinzelman W.R., Kulik J., Balakrishnan H.** (1999). Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks, *Proceedings of the ACM MobiCom '99*, ( ss. 174–185). Seattle, Washington.
- [8] **Shih E., Cho S., Ickes N., Min R., Sinha A., Wang A., Chandrakasan A.,** (2001). Physical layer driven protocol and algorithm design for energy-efficient wireless sensor networks, *Proceedings of ACM MobiCom '01*, (ss.272-286). Rome, Italy.
- [9] **Perkins C.** (2000). Ad Hoc Networks, *Addison-Wesley*. Reading, MA.
- [10] **Elson J., Estrin D.** (2001). Random, ephemeral transaction identifiers in dynamic sensor networks, *Proceedings 21st International Conference on Distributed Computing Systems*, (ss.459-468). Mesa, AZ, USA.
- [11] **Wu S., Lin C., Tseng Y., Sheu J.** (2000). A new multi channel MAC protocol with on-demand channel assignment for multihop mobile ad hoc networks, *International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms, and Networks, I-SPAN*, (ss. 232-237). Dallas.
- [12] **Kahn J.M., Katz R.H., Pister K.S.J.** (1999). Next century challenges: mobile networking for smart dust, *Proceedings of the ACM MobiCom '99*, (ss.271-278). Washington, USA.

- [13] **G. Bianchi**, “Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function”, *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 18, no. 3, pp. 535–547, 2000.
- [14] **W. Ye, J. Heidemann and D. Estrin**, “An energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks”, *Proc. INFOCOM*, pp. 1567-1576, 2002.
- [15] **Demirkol I., Ersoy C., Alagöz F.** (2006). MAC Protocols for Wireless Sensor Networks: A Survey, *IEEE Communications Magazine*, (44), 115-121.
- [16] **Van Dam T., Langendoen K.** (2003). An Adaptive EnergyEfficient MAC Protocol for Wireless Sensor Networks, *SenSys '03 Proceedings of the 1st international conference on Embedded networked sensor systems*, (ss.171-180). Los Angeles ,USA.
- [17] **Polastre J., Hill J., Culler D.** (2004). Versatile low power media access for wireless sensor networks, *SenSys '04 Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems*, (ss. 95-107). Baltimore ,USA.
- [18] **Varghese J., Rao S.V.** (2014). Energy efficient exponential decision MAC for energy harvesting-wireless sensor networks, *International Conference on Advances in Green Energy (ICAGE)*, (ss. 239-244). Thiruvananthapuram, India.
- [19] **T. Lei, Y. Sun, O. Gurewitz, and D. B. Johnson**, “PW-MAC: An energyefficient predictive-wakeup MAC protocol for wireless sensor networks”, *IEEE INFOCOM*, pp. 1305-1313, 2011.
- [20] **W. Heinzelman, A. Chandrakasan and H. Balakrishnan**, “Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks”, *IEEE Hawaii International Conference on System Sciences*, pp. 1-10, 2000.
- [21] **V. Rajendran, K. Obraczka and J. J. Garcia-Luna-Aceves**, “Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks”, *Wireless Networks*, vol. 12, no. 1, pp. 63-78, 2006.
- [22] **B.O. Jaleel, L. Mokdad, and B. Yahya**, “An energy efficient priority-based QoS MAC protocol for wireless sensor networks”, *IEEE International Conference on Communications*, pp. 1-6, 2011.
- [23] **I. Rhee, A. Warriar, M. Aia, J. Min and M. L. Sichitiu**, “Z-MAC: A hybrid mac for wireless sensor networks”, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 16, no. 3, pp. 511-524, 2008.
- [24] **I. Rhee, A. Warriar, J. Min and L. Xu**, “Drand: Distributed randomized TDMA scheduling for wireless ad hoc networks”, *ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, pp. 190-201, 2006.

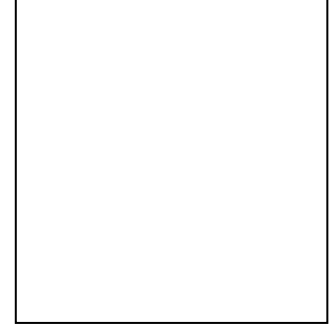
- [25] **Y. Kim, H. Shin and H. Cha**, “Y-MAC: An energy-efficient multi-channel MAC protocol for dense wireless sensor networks”, *International Conference Information Processing in Sensor Networks*, pp. 53-63, 2008.
- [26] LAN-MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society, *Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)*, IEEE, 2003.
- [27] **M. H. S. Gilani, I. Sarrafi, and M. Abbaspour**, “An adaptive CSMA/TDMA hybrid MAC for energy and throughput improvement of wireless sensor networks”, *Ad Hoc Networks*, vol. 11, no. 4, pp. 1297-1304, 2013.
- [28] **Kosunalp, S.** (2016). A new energy prediction algorithm for energy-harvesting wireless sensor networks with Q-learning. *IEEE Access*, 4, 5755-5763.
- [29] **Z. Liu, and I. Elhanany**, “RL-MAC: a reinforcement learning based MAC protocol for wireless sensor networks”, *International Journal of Sensor Networks*, vol. 1, no. 3, pp. 117-124, 2006.
- [30] **M. Mihaylov and Y. L. Borgne Elhanany**, “Decentralised reinforcement learning for energy-efficient scheduling in wireless sensor networks”, *Int. J. Communication Networks and Distributed Systems*, vol. 9, no. 3, pp. 207-224, 2012.
- [31] **Y. Chu, P.D. Mitchell and D. Grace**, “ALOHA and Q-learning based medium access control for wireless sensor networks”, *International Symposium on Wireless Communication Systems*, pp. 511-515, 2012.
- [32] **Y. Yan, P.D. Mitchell, T. Clarke and D. Grace**, “Distributed frame size selection for Q Learning based Slotted ALOHA protocol”, *International Symposium on Wireless Communication Systems*, pp. 733-737, 2013.
- [33] **Kosunalp, S., Mitchell, P. D., Grace, D., & Clarke, T.** (2016). Practical Implementation and Stability Analysis of ALOHA-Q for Wireless Sensor Networks. *ETRI Journal*, 38(5), 911-921.
- [34] **Y. Chu, P. D. Mitchell, and D. Grace**, “Reinforcement Learning based ALOHA for Multi-Hop wireless sensor networks with Informed Receiving”, *IET Wireless Sensor Systems*, pp. 1-6, 2012.
- [35] **G. Stefano, A. Liotta, and G. Fortino**, “QL-MAC: A Q-Learning based MAC for wireless sensor networks”, *Algorithms and Architectures for Parallel Processing*, pp. 267-275, 2013.
- [36] **Koşunalp, S., & Tabakcioğlu, M. B.** (2016, May). Medium access control protocols for wireless sensor networks with ambient energy. In *2016 24th Signal Processing and Communication Application Conference (SIU)* (pp. 641-644). IEEE.

- [37] **Kim, S., Vyas, R., Bito, J., Niotaki, K., Collado, A., Georgiadis, A., & Tentzeris, M. M.** (2014). Ambient RF energy-harvesting technologies for self-sustainable standalone wireless sensor platforms. *Proceedings of the IEEE*, 102(11), 1649-1666.
- [38] **Nintanavongsa P., Muncuk U., Lewis D.R., Chowdhury K.R.** (2012). Design Optimization and Implementation for RF Energy Harvesting Circuits, *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, 2 (1), 24-33.
- [39] **CANSIZ, M.** 915 MHz taşıyıcı frekansında RF enerji hasatlama. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 10(1), 91-98.
- [40] **A. P. Sample, D. J. Yeager, P. S. Powledge, A. V. Mamishev, and J. R. Smith,** “Design of an RFID-based battery-free programmable sensing platform,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 57, no. 11, pp. 2608–2615, Nov. 2008.
- [41] **D. D. Donno, L. Catarinucci, and L. Tarricone,** “An UHF RFID energy-harvesting system enhanced by a DC-DC charge pump in silicon-on-insulator technology,” *IEEE Microw. Wireless Compon. Lett.*, vol. 23, no. 6, pp. 315–317, Jun. 2013.
- [42] **A. Dolgov, R. Zane, and Z. Popovic,** “Power management system for online low power RF energy harvesting optimization,” *IEEE Trans. Circuits Syst. I, Reg. Papers*, vol. 57, no. 7, pp. 1802–1811, Jul. 2010.
- [43] **M. Pinuela, P. D. Mitcheson, and S. Lucyszyn,** “Ambient RF energy harvesting in urban and semi-urban environment,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 61, no. 7, pp. 2715–2726, Jul. 2013.
- [44] **T. Ajmal, V. Dyo, B. Allen, D. Jazani, and I. Ivanov,** “Design and optimisation of compact RF energy harvesting device for smart applications,” *Electron. Lett.*, vol. 50, no. 2, pp. 111–113, Jan. 2014.
- [45] **E. Falkenstein, M. Roberg, and Z. Popovic,** “Low-power wireless power delivery,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 60, no. 7, pp. 2277–2286, Jul. 2012.
- [46] **Kim, S., Vyas, R., Bito, J., Niotaki, K., Collado, A., Georgiadis, A., & Tentzeris, M. M.** (2014). Ambient RF energy-harvesting technologies for self-sustainable standalone wireless sensor platforms. *Proceedings of the IEEE*, 102(11), 1649-1666.
- [47] **H. S. Kim, J. -H. Kim, and J. Kim,** “A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration,” *Int. J. Precision Eng. Manuf.*, vol. 12, no. 6, pp. 1129–1141, Dec. 2011.
- [48] **Orecchini, G., Yang, L., Tentzeris, M. M., & Roselli, L.** (2011, June). Wearable battery-free active paper printed RFID tag with human-energy scavenger. In *2011 IEEE MTT-S International Microwave Symposium* (pp. 1-4). IEEE.

- [49] **Koşunalp, S.** (2018). GÜNEŞ ENERJİSİ KULLANAN SİSTEMLER İÇİN YENİ BİR ENERJİ TAHMİN ALGORİTMASI. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 23 (1), 369-378.
- [50] **E. Wang, X. Lin, A. Adhikary, A. Grovlen, Y. Sui, Y. Blankenship, J. Bergman, H.S. Razaghi,** “A Primer on 3GPP Narrowband Internet of Things”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 3, pp. 117–123, Mar. 2017.
- [51] **T. Adame, A. Bel, B. Bellalta, J. Barcelo, M. Oliver,** “IEEE 802.11ah: The WiFi Approach for M2M Communications”, *IEEE Wireless Communications*, vol. 21, no. 6, pp. 144–152, Dec. 2014.
- [52] **Abramson N.** (1970). THE ALOHA SYSTEM: another alternative for computer communications, *AFIPS fall joint computer conference*, (ss. 281-285). Houston.
- [53] **Akın, E., Demir, K., & Yetgin, H.** (2021). Etkili durum farkındalığı için çok aracı Q-öğrenme tabanlı İHA yörünge planlaması. *Türk Elektrik Mühendisliği ve Bilgisayar Bilimleri Dergisi*, 29 (5), 2561-2579.
- [54] **Shelke, P., Kulkarni, S., Yelpale, S., Pawar, O., Singh, R., & Deshpan, K.** (2018). A NodeMCU based home automation system. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 5(6), 127-129.
- [55] **Datasheet for nRF24L01 platform.** Accessed April 2022. [https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01PI\\_uss\\_Preliminary\\_Product\\_Specification\\_v1\\_0.pdf](https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/nRF24L01PI_uss_Preliminary_Product_Specification_v1_0.pdf)
- [56] **A. Kochut, A. Vasan, A. Shankar and A. Agrawala,** “Sniffing out the correct physical layer capture model in 802.11b”, *IEEE International Conference on Network Protocols*, pp. 252-261, 2004.

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Sami AÇIK  
**Doğum Tarihi ve Yeri** :  
**E-posta** :



### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2013, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Mimarlık-Mühendislik Fakültesi, Elektirik-Elektronik Mühendisliği
- **Yüksek Lisans** : 2022, Bursa Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- Gaziantep İslam Bilim ve Teknoloji Üniversitesinde Araştırma Görevlisi (2022-devam ediyor)

### TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **S.Açık, M.B. Tabakcioglu, S. Kosunalp** (2021). Energy Harvesting Based Wireless Sensor Networks Protocols. 9TH INTERNATIONAL ADVANCED TECHNOLOGIES SYMPOSIUM (IATS'21)
- **S.Açık, S. Kosunalp, M.B. Tabakcioglu** (2022). On the Throughput of pure ALOHA with Different Power Levels for Wireless Sensor Networks. Seventh International Scientific Conference “Telecommunications, Informatics, Energy and Management” ( TIEM 2022 )