

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA AHP VE YSA YÖNTEMLERİNE
DAYALI ROTALAMA**

DOKTORA TEZİ

Volkan GANGAL

**EKİM 2024
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA AHP VE YSA YÖNTEMLERİNE DAYALI
ROTALAMA**

Volkan GANGAL

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
DOKTOR (ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ)
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 26 / 08 / 2024

Tezin Savunma Tarihi : 02 / 10 / 2024

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Gökçe HACIOĞLU
ORCID : - - -

Trabzon 2024

ÖNSÖZ

“Kablosuz Algılayıcı Ağlarda AHP ve YSA Yöntemlerine Dayalı Rotalama” isimli bu tez Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Doktora Programı’nda hazırlanmıştır.

Tez çalışmam boyunca bana hiçbir desteğini esirgemeyen ve bilim insanı olma yolundaki ilk adımlarımı atarken kıymetli bilgileriyle ve tecrübesiyle yolumu aydınlatan, danışman hocam Sayın Prof. Dr. Gökçe HACIOĞLU’na teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca, yapıcı eleştirileri ve önerileri ile tezime büyük katkıları bulunan, saygıdeğer hocalarım Sayın Prof. Dr. Ali GANGAL ve Sayın Doç. Dr. Sedat GÖRMÜŞ’e, eğitim öğretim hayatımda katkısı olan tüm hocalarıma teşekkür ederim.

Tez çalışması sürecinde bana desteklerini esirgemeyen TMYO Elektronik ve Otomasyon Bölüm Başkanı Sayın Öğr. Gör. Dr. Güneş EKİM’e ve değerli bölüm hocalarıma teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, doğduğum günden beri elimi hiç bırakmayan, hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım ve her kararında arkamda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve bugünlere gelmemde en büyük paya sahip olan annem Neriman GANGAL ve babam Mehmet GANGAL’a, teşekkür eder, minnettarlığımı sunarım.

Bu tez çalışmasının bundan sonraki çalışmalara katkı sağlamasını temenni ederim.

Volkan GANGAL

Trabzon 2024

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Doktora Tezi olarak sunduğum “Kablosuz Algılayıcı Ağlarda AHP ve YSA Yöntemlerine Dayalı Rotalama” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Gökçe HACIOĞLU’nun sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 02/10/2024

Volkan GANGAL

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ	XII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Algılayıcı Düğümü ve Yapısı.....	2
1.2. KAA Uygulama Alanları.....	3
1.2.1. Askeri Uygulamalar	3
1.2.2. Endüstriyel Otomasyon.....	4
1.2.3. Akıllı Tarım.....	5
1.2.4. Çevresel İzleme ve Kontrol.....	5
1.2.5. Sağlık Gözetim.....	6
1.2.6. Akıllı Kent/Ulaşım Uygulamaları:.....	7
1.3. KAA’lardaki Güncel Zorluklar	9
1.3.1. Hizmet Kalitesi (Quality of Service, QoS)	9
1.3.2. Ağ Ömrü	10
1.3.3. Hata Toleransı	10
1.3.4. Ölçeklenebilirlik.....	11
1.3.5. KAA’larda Güvenlik.....	11
1.4. KAA Protokol Yığını	12
1.4.1. Fiziksel Katman	13
1.4.2. Veri Bağlantı Katmanı	14
1.4.3. Ağ Katmanı	14
1.4.4. Taşıma Katmanı	15
1.4.5. Uygulama Katmanı	15
1.5. Rotalama Protokolleri.....	16

1.5.1. Ağ Organizasyonu.....	18
1.5.2. Rota Keşfi	25
1.5.3. Protokol İşlemi	26
1.6. Enerji Tüketim Modeli	28
1.6.1. Serbest Uzay Modeli	28
1.6.2. Çok Yollu Sönümlenme Modeli	30
1.7. Analitik Hiyerarşi Prosesi	31
1.8. Yapay Sinir Ağları.....	33
2. YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	39
2.1. Dağıtık LEACH-AHP Rotalama Yöntemi	39
2.1.1. Önerilen AHP’li Eşik belirme süreci	41
2.2. YSA Destekli Küme Başkanı Seçim Yöntemi	49
2.2.1. Önerilen Eşik Belirleme Yöntemi	54
3. BULGULAR VE TARTIŞMA	59
3.1. Dağıtık LEACH-AHP Yöntemine Dair Bulgular	59
3.2. YSA Destekli Küme Başkanı Seçim Yöntemine Dair Bulgular	68
3.2.1. YSA Verilerini Kullanarak Eğri Uydurmaya Dair Bulgular	74
4. SONUÇLAR.....	81
5. ÖNERİLER.....	83
6. KAYNAKLAR	84
7. EKLER.....	93
ÖZGEÇMİŞ	

Doktora Tezi

ÖZET

KABLOSUZ ALGILAYICI AĞLARDA AHP VE YSA YÖNTEMLERİNE DAYALI
ROTALAMA
Volkan GANGAL

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Gökçe HACIOĞLU
2024, 92 Sayfa, 1 Sayfa Ek

Kablosuz algılayıcı ağlarda, araştırmacıların üstesinden gelmeye çalıştığı en önemli zorluklardan biri enerji tüketimidir. Düğümlerin kısıtlı enerji kapasiteleri nedeniyle enerji etkin rotalama yaklaşımları önem arz etmektedir. Bu çalışmada enerji tüketimini azaltarak ağ ömrünü artırmayı hedefleyen iki yöntem tanıtılmaktadır. Dağıtık LEACH-AHP yaklaşımında düğümlerin enerji seviyesi ve baz istasyonuna uzaklık bilgileri kullanılarak optimum eşik değerini AHP ile belirlemeyi amaçlayan dağıtık bir yöntem tanıtılmıştır. Sonuçlar, önerilen yöntemin LEACH'e kıyasla ağ ömrünü iki katına çıkardığını ve BS'ye gönderilen paket sayısında %50 oranında bir artış sağladığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, önerilen yöntem ile yüksek işlem gücü gerektiren merkezi KMHPSO algoritması arasında karşılaştırmalı bir analiz gerçekleştirilmiştir. YSA tabanlı diğer yöntemde, küme başkanı seçimi için eşik değeri belirlemede YSA kullanılmıştır. Bu yöntemde, düğümler baz istasyonuna olan uzaklıklarına göre dört farklı kategoriye ayrılmıştır. YSA eğitiminde ise düğümlerin başlangıç enerji düzeyleri, mevcut enerji düzeyleri, kategorileri ve olası eşik değerleri kullanılmıştır. Önerilen yöntemin, LEACH ve son yıllardaki bazı çalışmalarla karşılaştırıldığında önemli bir iyileşme sağladığı gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: KAA, AHP, LEACH, Rotalama, YSA, Enerji etkin

PhD. Thesis

SUMMARY

ROUTING BASED ON AHP AND ANN METHODS IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

Volkan GANGAL

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Electrical and Electronics Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Gokce HACIOGLU
2024, 92 Pages, 1 Page Appendix

In wireless sensor networks, one of the most important challenges that researchers are trying to overcome is energy consumption. Due to the limited energy capacity of nodes, energy efficient routing approaches are important. In this paper, we introduce two methods that aim to increase network lifetime by reducing energy consumption. In the distributed LEACH-AHP approach, a distributed method is introduced that aims to determine the optimal threshold value by AHP using the energy level of the nodes and the distance to the base station. The results show that the proposed method doubles the network lifetime compared to LEACH and achieves a 50% increase in the number of packets sent to the BS. Furthermore, a comparative analysis between the proposed method and the centralized KMHPSO algorithm, which requires high processing power. In the other ANN-based method, ANN is used to determine the threshold value for cluster head election. In this method, nodes are categorized into four different categories according to their distance from the base station. Initial energy levels, current energy levels, categories and possible threshold values of the nodes are used in ANN training. It is shown that the proposed method provides a significant improvement compared to LEACH and some recent studies

Key Words: WSN, AHP, LEACH, Routing, ANN, Energy-efficient

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1. Algılayıcı düğümü ve temel öğeleri	2
Şekil 2. KAA uygulama alanları	3
Şekil 3. Akıllı ulaşım sistemlerine dair bir örnek	8
Şekil 4. KAA Protokol Yığını.....	12
Şekil 5. Bir MicaZ düğümünün güç tüketiminin dökümü (Akyildiz & Vuran, 2010).....	16
Şekil 6. Rotalama Protokolleri (Al-Karaki & Kamal, 2004)	18
Şekil 7. Hiyerarşik kümeleme tabanlı rotalama mimarisi.....	19
Şekil 8. Zincir tabanlı rotalama yapısına dair bir gösterim.....	20
Şekil 9. Tek duraklı rotalama (solda) ve çok duraklı rotalama (sağda)	27
Şekil 10. Birinci dereceden radyo modeli.....	29
Şekil 11. Biyolojik sinir hücresinin temsili çizimi.....	34
Şekil 12. McCulloch ve Pitts (1943) nöron modeli	35
Şekil 13. Çok katmanlı yapay sinir ağlarına dair bir örnek	36
Şekil 14. Herhangi bir topoloji için eşik değeri (T) belirleme süreci.	49
Şekil 15. MATLAB ortamında uygulanan 5-5-5 gizli katmanlı YSA'nın blok diyagramı	56
Şekil 16. Düğümlerin BS'den uzaklıklarına göre kategorizasyonu.....	57
Şekil 17. Denklem (41)'e göre elde edilen ve BS'nin ağıın merkezinde olduğu duruma ait eşik değerleri ve oluşum sayıları	60
Şekil 18. Denklem (41)'e göre elde edilen ve BS'nin uzakta olduğu duruma ait eşik değerleri ve oluşum sayıları	61
Şekil 19. Denklem (42)'ye göre elde edilen ve BS'nin ağıın merkezinde olduğu duruma ait eşik değerleri ve oluşum sayıları	61
Şekil 20. Denklem (42)'ye göre elde edilen ve BS'nin ağdan uzakta olduğu duruma ait eşik değerleri ve oluşum sayıları	62
Şekil 21. BS ağıın merkezinde olduğunda toplam enerjinin değişimi.....	63
Şekil 22. BS ağıın uzağında olduğunda toplam enerjinin değişimi	64
Şekil 23. 5-5-5 Gizli katmanlı YSA'nın validasyon performansı.....	68
Şekil 24. 5-5-5 Gizli katmanlı sinir ağına ait regresyon grafikleri	69
Şekil 25. Kalan enerjinin döngü sayısına göre değişimi.....	70
Şekil 26. Hayatta kalan düğümlerin döngü sayılarına göre değişimi	71

Şekil 27.	BS'ye iletilen toplam paket sayısının döngü sayısına göre değişimi	72
Şekil 28.	Döngü sayısına göre eşik ortalamalarının değişimi.....	72
Şekil 29.	Farklı kategorilere ait enerji tüketimi	73
Şekil 30.	Birinci kategoriye ait eşik-enerji eğrisi.....	75
Şekil 31.	İkinci kategoriye ait eşik-enerji eğrisi	76
Şekil 32.	Üçüncü kategoriye ait eşik-enerji eğrisi	77
Şekil 33.	Dördüncü kategoriye ait eşik-enerji eğrisi.....	78
Şekil 34.	YSA destekli rotalama yöntemiyle eğri uydurmalı yöntemin toplam enerji-döngü sayısı bakımından karşılaştırılması	79
Şekil 35.	YSA destekli rotalama yöntemiyle eğri uydurmalı yöntemin toplam paket sayısı bakımından karşılaştırılması	80



TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Her katmanda güç tüketimine neden olan ana işlemler	13
Tablo 2. Radyo karakteristikleri.....	29
Tablo 3. AHP değerlendirme ölçeği	32
Tablo 4. Uzaklık ve kalan enerji düzeyi kriterlerine göre karşılaştırma tablosu	41
Tablo 5. Kalan enerji düzeyi kriterine göre ikili karşılaştırma matrisi	42
Tablo 6. BS'ye uzaklık kriterine göre ikili karşılaştırma matrisi.....	42
Tablo 7. Güncel bazı çalışmalar.....	53
Tablo 8. BS'den uzaklıklarına göre düğümlerin kategorileri	57
Tablo 9. Simülasyonlarda kullanılan parametrelere ait değerler	59
Tablo 10. Kalan enerji düzeyi kriterine göre ikili karşılaştırma matrisi	65
Tablo 11. Simulasyon durumlarına ait detaylar	66
Tablo 12. Önerilen yöntemin ağ ömrü bakımından LEACH ve LEACH DCHS ile kıyaslanması	67
Tablo 13. İlk ölen düğümlerin döngü sayıları.....	67
Tablo 14. Farklı gizli katmanlara sahip YSA'nın performans ölçütleri	69
Tablo 15. Son çalışmalarla önerilen yöntemin performans analizi.....	74
Tablo 16. Eğri uydurma fonksiyonlarına ait performans ölçütleri.....	78

SEMBOLLER VE KISALTMALAR DİZİNİ

KAA	: Kablosuz algılayıcı ağları
YSA	: Yapay sinir ağları
AHP	: Analitik hiyerarşi prosesi
AUS	: Akıllı ulaşım sistemleri
IoT	: Internet of things (Nesnelerin interneti)
OSI	: Open systems interconnection (Açık sistemler ara bağlantısı)
TLC	: Traffic light controller (Trafik ışık kontrolcüsü)
MCU	: Microcontroller unit (Mikrodenetleyici birimi)
LOS	: Line of sight (Görüş hattı)
MLP	: Multi layer perceptron (Çok katmanlı algılayıcı)
BS	: Base station (Baz istasyonu)
T	: Eşik değeri
KB	: Küme başkanı
$\overline{KB}$	: Küme başkanı değil
N	: Ağdaki toplam düğüm sayısı
n	: Enerji ve uzaklık durumu sayısı
C	: Enerjinin uzaklığa baskınlık derecesini içeren dizi
P	: Küme başkanı seçim periyotlarını barındıran dizi
D	: Tüm T eşik değerlerini barındıran matris
e	: Satır indeksi (e), belirli bir düğümden daha düşük enerjiye sahip düğümlerin toplam kalan düğümlere oranını belirtir
u	: Sütun indeksi (u), baz istasyonuna ağdaki belirli bir düğümden daha yakın olan kalan düğümlerin oranını belirtir
$D(e, u)$	: D matrisinin e ve u indekslerine karşılık gelen elemanı
SSE	: Sum of squares due to error (Hatadan kaynaklanan kareler toplamı)
MSE	: Mean square error (Hataların karesinin ortalaması)
RMSE	: Root mean square error (Hataların kare ortalama karekökü)
MAPE	: Mean absolute percentage error (Ortalama mutlak yüzdesel hata)

1. GENEL BİLGİLER

Kablosuz Algılayıcı Ağları (KAA) iki veya daha fazla algılayıcı düğümünden oluşan ve bu düğümler vasıtası ile çevresel koşullara dair ısı, sıcaklık, nem, hareket vs. gibi verileri toplayıp bir merkeze iletmeyi amaçlayan sistemlerdir (Akyildiz, Su, Sankarasubramaniam, & Cayirci, 2002). Algılayıcı düğümleri, sınırlı işlem kapasitesine sahip olmakla beraber bir işlemci birimini, hedeflenen veriyi toplayacak sensör/aktüatör birimini, bu verileri bir merkeze veya bir başka düğüme iletebilmek için iletişim ünitesini ve bütün bu birimlerin ihtiyaç duyacağı güç ünitesini (batarya) içeren nispeten küçük cihazlardır. Tarihsel olarak KAA'ların 70'li yılların ortasında harekât alanında istihbarat toplamak ve can kayıplarını azaltmak maksadıyla kullanıldığı ifade edilmektedir (Pantazis, Nikolidakis, & Vergados, 2012). Bu ilksel kullanımda sensör düğümleri boyutları itibarıyla daha büyük ve enerji verimliği açısından da etkin değildi. Daha sonra gelişen teknolojileri sayesinde boyutlar küçülmüş, işlem gücü artmış ve enerji tüketimi daha efektif hale gelmiştir.

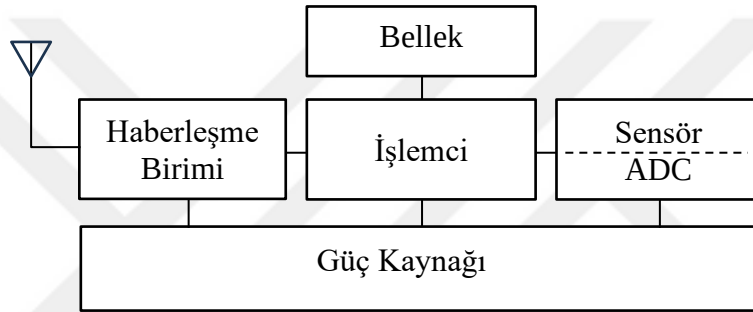
Literatürde araştırmacıların KAA'larla ilgili üstesinden gelmeye çalıştıkları birkaç odak noktası bulunmaktadır. Bunlardan üzerinde en fazla durulan konu kısıtlı batarya kapasitelerinin etkin kullanılması üzerinedir. Bu sayede algılayıcı düğümlerinin uzun süre görev alanında kalması, veri toplaması ve bakım gereksinimini azaltması sağlanmış olur. Sensör düğümlerindeki güç tüketiminin en fazla haberleşme esnasında olduğu düşünüldüğünde, bu sürecin daha etkin yönetilmesi ağ ömrünü önemli oranda etkileyebilecektir. Bu maksatla araştırmacılar birbirinden farklı yöntemler kullanarak yeni rotalama algoritmaları geliştirmeye devam etmektedirler. Algılayıcı düğümlerin konumları, baz istasyonundan (BS) uzaklığı, enerji durumu, ağ büyüklüğü göz önüne alındığında otonom, merkezi, hiyerarşik vs. gibi farklı sınıflandırmalarda enerji etkin sonuç üreten rotalama algoritmaları sunulmuştur.

Bu bağlamda sunulan doktora tezinin merkezinde KAA'lardaki kısıtlı batarya kapasitesini etkin şekilde kullanmayı hedefleyen ve rakipleriyle yarışabilir bir yöntem bulunmaktadır. Bu amaçla Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) kullanılarak hiyerarşik ve kümelemeli bir yaklaşım önerilmiş, sonuçları kıyaslanarak tartışılmıştır. Ayrıca Yapay Sinir Ağları (YSA) ile küme başkanının belirlendiği bir başka yaklaşım önerilmiş ve mevcut güncel yöntemlerle kıyaslanmıştır. Son bölümde, YSA tabanlı küme başkanı seçim

yönteminin bir uzantısı olarak YSA verileri kullanılmak suretiyle bir yöntem daha incelenmiştir.

1.1. Algılayıcı Düğümü ve Yapısı

Bir algılayıcı düğümü temelde farklı alt birimlerin anlamlı kombinasyonundan oluşur. Basit bir algılayıcı düğümü sınırlı işlem kapasitesine sahip bir işlemciye, bu işlemciye ait belleği, sensör birimini, haberleşme birimini ve bütün bu birimlere enerji sağlayabilecek bir güç kaynağı birimini içerir. Şekil 1’de algılayıcı düğümüne ait temel ögeler gösterilmiştir.



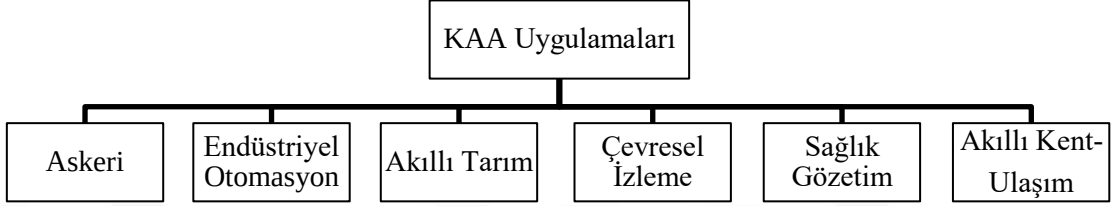
Şekil 1. Algılayıcı düğümü ve temel ögeleri

KAA’larda, sensör düğümleri genelde IEEE 802.15.4 standardını kullanarak birbirleriyle iletişim kurar (Akyildiz & Vuran, 2010). Ağ topolojisine bağlı olarak, veri iletişimi rotalama protokolüne göre tek duraklı ya da çok duraklı olarak gerçekleşebilir. Çoğu durumda algılayıcı düğümleri, algıladıkları verileri bir baz istasyonuna (BS, sink), gönderir. Baz istasyonu elektrik şebekesine bağlı olduğundan enerji ihtiyacı bulunmaz. Son olarak BS topladığı verileri planlanan hedefe gönderir (Bhat & Passi, 2022).

Algılayıcı düğümleri node yahut mote şeklinde ifade edilebilmektedir. Farklı nitelikleri barındıran düğüm türleri mevcuttur. Dolayısıyla kullanılan sensör düğümü, uygulamaya bağlı olmak üzere değişkenlik gösterebilmektedir. Örneğin sismik vibrasyon izlemede LOTUS platformu öne çıkarken bina içi izleme, akustik, geniş ölçekli sensör ağlarında IRIS platformu öne çıkmaktadır (Khalifeh, Mazunga, Nechibvute, & Nyambo, 2022).

1.2. KAA Uygulama Alanları

Kablosuz algılayıcı ağları, literatürde gittikçe çeşitlenen uygulama alanlarıyla dikkat çekmektedir. Bu çalışmada, KAA uygulama alanları altı ana başlıkta ele alınmıştır: Askeri, endüstriyel otomasyon, akıllı tarım, çevresel izleme, sağlık gözetim ve akıllı kent/ulaşım uygulamaları.



Şekil 2. KAA uygulama alanları

1.2.1. Askeri Uygulamalar

Kablosuz algılayıcı ağları, kritik alanları gözetleme, düşman arazisini keşif ve takip, savaş alanı yönetiminde farklı gelişmiş yetenekler sağlayarak askeri operasyonlara oldukça yardımcıdırlar. Pragadeswaran vd. (2021) KAA'ların askeri bağlamdaki uygulamalarını araştırmış, durumsal farkındalığın ve gerçek zamanlı veri toplamanın iyileştirilmesindeki rollerini vurgulamıştır. Ayrıca veri bütünlüğünü ve güvenliğini korumadaki zorluklara da dikkat çekmiştir. Ali vd. (2020) KAA'ları kullanarak gelecekteki savaş alanı komuta sistemlerinin güçlendirilmesini tartışarak, gerçek zamanlı bilgi akışı ve karar verme desteğinin faydalarını izah ederek, ağın sağlamlığı ve esnekliği ile ilgili konulara da dikkat çekmiştir. Qichen vd. (2022) şifreleme ve izinsiz giriş tespit yöntemlerindeki ilerlemeyi tartışarak KAA'lar için güvenlik teknolojilerine odaklanmıştır. Moorthy vd. (2020) çeşitli tehditleri ve karşı önlemleri vurgulayarak savunma alanındaki KAA'lara ilişkin güvenliğe genel bir bakış sunmuştur. Fahmy (2020) KAA uygulamalarına ilişkin geniş bir genel bakış sunarak askeri senaryolardaki kullanımlarını detaylandırmış, ancak aynı zamanda enerji verimliliği ve ağ ölçeklenebilirliği ile ilgili sorunlara da dikkat çekmiştir. Behera ve Mohapatra (2021) askeri KAA uygulamalarındaki enerji açığı sorununu hafifletmek için yeni bir plan önererek enerji dağıtımının ve ağ ömrünün iyileştiğini ancak büyük ölçekli konuşlandırmalarda zorluklara dikkat çekmiştir. Mahamuni ve Jalaudiddin (2021) KAA'ların entegre derin öğrenmeyi kullanarak askeri gözetlemede izinsiz giriş gözetimini araştırmış;

birden fazla nesnenin gelişmiş tespit ve takibini göstermiştir. Bu arada hesaplama karmaşıklığı ve gerçek zamanlı işlemeyi önemli zorluklar olarak tanımlamıştır. Prasanna ve Rao (2012) KAA uygulamaları ve güvenliğine ilişkin bir genel bakış sunmuş, güçlü şifreleme yöntemlerinin önemini vurgulamış ayrıca güvenlik protokollerindeki boşlukları ve saldırılara karşı savunmasızlığı tespit etmiştir.

Bunlardan başka, Ledeczi vd. (2005), Şehir Savaşı İçin Kontra Keskin Nişancı Sistemi adını verdikleri yayınlarında kentsel ortamlarda dahi atıcıları (sniper) algılayan ve doğru bir şekilde konum tespitini yapan bir sistem önermiştir. Sunulan KAA tabanlı çözüm, kentsel alanlarda yaygın olan akustik çok yollu etkileri hesaba katarak ve birden fazla eşzamanlı atışı çözümleyebilmektedir.

Ayrıca askeri maksatla tasarlanan ve literatürde çokça adı geçen VigilNet, birlikte çalışan bir grup algılayıcı düğümünün, enerji tasarruflu ve gizli bir şekilde hareket eden araçların konumlarını tespit etmesine ve izlemesine olanak tanır (He, ve diğerleri, 2006). Ağın tasarımı ve uygulaması, araçların ve manyetik nesnelerin hareketiyle oluşan manyetik alanı algılayan manyetik sensörlerle donatılmış 70 Mica2 düğümüne dayanmaktadır. Bu uygulamanın temel amacı, sensör düğümleri aracılığıyla enerji tasarruflu gözetim desteği sağlamaktır. VigilNet, hiyerarşik bir düzenle geliştirilmiştir. Şöyle ki nöbetçi olarak adlandırılan belirli düğümler, çok duraklı rotaları sürdürmekten ve bir olay meydana gelene kadar düşük güç durumunda kalan nöbetçi olmayan düğümlerin olay tabanlı çalışmasını yönetmekten sorumludur. Bir olay durumunda, ağ, nöbetçilerin yardımıyla ilgili düğüm grubunu içeren kümeler halinde yeniden organize edilir (Akyildiz & Vuran, 2010).

1.2.2. Endüstriyel Otomasyon

Kablosuz algılayıcı ağları, endüstriyel algılama ve kontrol uygulamaları, bina otomasyonu ve erişim kontrolü gibi endüstriyel alanlarda uzun zamandır kullanılmaktadır. (Akyildiz & Vuran, 2010). Dolayısıyla, endüstriyel süreçlerin idamesinde, makinaların, bantların görevlerinde, eskimiş endüstriyel tesisin modernleştirilmesinde, kalite ve kontrolün sağlanmasında, verimliliğin artırılmasında oldukça önemli yararlar sağlar. Güngör ve Hancke (2013) çeşitli uygulamaları, protokolleri ve standartları tartışarak birlikte çalışabilirlik ve ölçeklenebilirlik konularını vurgulayarak endüstriyel KAA'lara dair kapsamlı bir genel bakış sunmuştur. Kandris vd. (2020) KAA uygulamaları hakkında güncel bir araştırma yayını sunarak bunların çevresel izleme, sağlık hizmetleri ve endüstriyel

otomasyondaki rollerini vurgulamış, enerji tüketimi ve ağ ölçeklenebilirliği ile ilgili sorunlara da dikkat çekmiştir. Liu vd. (2020), güç iletimi ve dağıtımında KAA teknolojisini inceleyerek verimlilik ve güvenilirlikteki gelişmelere değinmiştir. Ayrıca entegrasyon ve gerçek zamanlı veri işlemedeki zorluklara da ilgili yayında dikkat çekilmiştir. Landaluce vd. (2020) RFID ve KAA'ları kullanan IoT algılama uygulamalarını inceleyerek gerçek zamanlı izleme ve envanter yönetiminin faydalarını tartışmış, ancak birlikte çalışabilirlik ve standardizasyonu ana engeller olarak tanımlamıştır.

1.2.3. Akıllı Tarım

Akıllı tarım, bitkilerin ve toprağın pek çok parametre ile takibi sayesinde mahsülün verimin artırılmasına yardımcı olur. Verilen su, ilaç yahut gübrenin de bu sayede optimizasyonu mümkün olup bu kalemlerde tasarruf sağlanabilir. Zervopoulos vd. (2020) hassas tarım için KAA senkronizasyonunu araştırmış, mahsul veriminin ve kaynak yönetimi verimliliğinin arttığını ortaya koymuş, senkronizasyon ve dağıtım sorunlarını da ele almıştır. Ayrıca bir tarlada verimi artırmak için peş peşe aynı bitki yetiştirilmez. Dolayısıyla bir sonraki yetiştirme için hangi bitkinin daha verimli olacağı KAA yoluyla belirlenebilir. İşte Varman vd. (2017) bir sonraki ürün rotasyonu için uygun ürünü tahmin etmek ve seçici sulama ile tarlanın sulama sistemini uygun hale getirilmesini amaçlayan bir çalışma ortaya koymuşlardır. Yukarıdaki hedefe tarlanın periyodik olarak izlenmesiyle ulaşılır.

Yine Khoa vd. (2019) çalışmalarında su seviyesi, toprak nemi, sıcaklık, nem ve yağmur sensörleri gibi ucuz ve oldukça verimli bileşenlerin kullanımına dayalı yeni bir sensör düğümü topolojisi önerilmiştir.

1.2.4. Çevresel İzleme ve Kontrol

KAA'lar, orman yangınlarını, su kalitesini, heyelan takibini, hava kirliliği düzeyini, su kalitesini, sel riskini ve diğer çevresel değişkenleri izlemek için kullanılabilir. Bu veriler sayesinde meydana gelebilecek doğal afetlere karşı hazırlıklı olma, felaket anında da daha hızlı müdahale etme ve çevresel sürdürülebilirliği artırma mümkün hale gelir. Othman ve Shazali (2012) çevresel izlemede KAA uygulamalarını analiz etmiş, kirlilik tespiti ve yaban hayatı takibinde başarılı örnekler sunmuştur. Çalışmada ayrıca sensör dayanıklılığı ve veri doğruluğu ile ilgili sorunlara dikkat çekilmiştir. Hamami ve Nassereddine (2020) sulamada KAA uygulamalarını araştırmış; su yönetimi ve ürün sağlığının nasıl iyileştiğini

göstermiştir. Ayrıca çalışmada sensör bakımı ve enerji verimliliğiyle ilgili sorunlar da vurgulanmıştır.

Ayrıca literatürde KAA'ların uygulama alanları içinde aktif volkanların takibiyle ilişkili çalışmalar da bulunur. Örneğin Werner-Allen vd. (2006) Ekvador'un merkezi ve kuzeyindeki volkanların gözetimi için KAA kullanımını önermiş ve iki prototip ağı iki sahada konuşlandırmıştır. Ekvador'un merkezindeki konuşlandırma mikrofonları barındıran üç kablosuz algılayıcı düğümünden oluşuyordu. Diğer konuşlandırma, sismoakustik sensörleri barındıran 16 sensör düğümüyle daha büyük bir ağdan oluşuyordu. Ağ doğrusal bir topolojiye sahipti ve 3 km uzunluğa kadar uzanıyordu. Aktif volkan izlemede önemli bir görev, püskürmeler, depremler veya titreme aktiviteleri gibi ayrı olayları yakalamaktır (Dargie & Poellabauer, 2010).

1.2.5. Sağlık Gözetim

KAA'lar, insanların sağlık durumlarına dönük tıbbi durumlarını teşhis ve tespit etmek, acil durumlarda sağlık merkezlerini bilgilendirmek, hastaların önemli/kritik sağlık verilerini izlemek veya sürekli takibi gereken insanların yaşam kalitesini artırmak maksadıyla kullanılabilir. Bu sistemler, giyilebilir sensörler aracılığıyla vücut sıcaklığını, nabızı, kan basıncını ve diğer sağlık göstergelerini sürekli olarak izleyebilir.

Kablosuz algılayıcı ağlar, hastaların hayati verileri sürekli olarak izlemek için kullanılabilir. Örneğin, Dey vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada, kablosuz sensör ağları kullanılarak elektrokardiyogram (EKG) verilerinin izlenmesi ve değerlendirilmesi için bir sistem geliştirilmiştir. Bu sistem, hastaların kalp ritimlerini sürekli olarak izleyerek, anormallikleri erken tespit edebilir ve sağlık merkezine bildirimde bulunabilir. Yine KAA'lar, yaşlı bakımında ve evde sağlık hizmetlerinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Borz vd. (2020) yaşlıların evde bağımsız olarak yaşamalarını desteklemek amacıyla geliştirilen kablosuz sensör ağları tabanlı bir sağlık izleme sistemini ele almıştır. Bu sistem, düşme algılama, hareket takibi ve acil durum çağrıları gibi özellikler sunar. Zhang vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada, giyilebilir sensörler kullanılarak kronik hastalıkların yönetimi için güvenilir bir izleme sistemi geliştirilmiştir. Bu sistem, hastaların sağlık verilerini toplar ve analiz ederek, tedavi planlarının optimize edilmesine yardımcı olur. Ayrıca acil durumlarda hızlı ve etkili müdahale sağlamak için kullanılabilir. Wu vd. (2018) çalışmasında, kanama tespiti için geliştirilen bir sistem tanıtılmıştır. Bu sistem, intravenöz

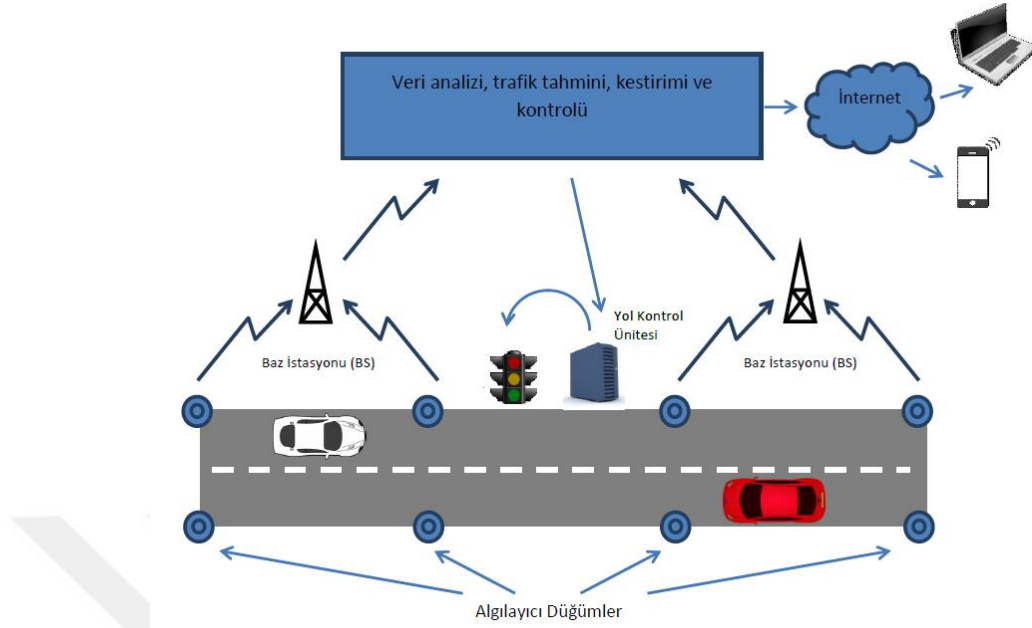
ve diyaliz tedavilerinde kanama algılama ve bildirim fonksiyonlarına sahiptir, böylece acil durumlarda hızlı müdahale edilmesini sağlar. Uyku kalitesinin izlenmesi içinde kablosuz algılayıcı ağlar kullanılabilir. Milici vd. (2018) uyku kalitesini izlemek için manyetometre tabanlı bir giyilebilir sensör geliştirmiştir. Bu sistem, uyku sırasında vücut hareketlerini ve pozisyon değişikliklerini izleyerek, uyku kalitesini değerlendirmeye yardımcı olur.

1.2.6. Akıllı Kent/Ulaşım Uygulamaları

KAA'lar, trafik yoğunluğunu izlemek, trafik ışıklarını optimize etmek, şebekenin enerji tüketimini izlemek veya kamu güvenliğini artırmak gibi akıllı şehir uygulamalarında kullanılabilir. Bu sayede KAA'lar şehirlerin daha temiz, verimli, güvenli ve sürdürülebilir olmasına katkı sağlarlar. Başka bir anlamda, ulaşım sistemlerinin verimliliğini ve güvenliğini artırmak için yazılım, donanım ile ilişkili ve KAA'ların entegrasyonudur (Sharma, Haque, & Blaabjerg, 2021; Chowdhury & Sadek, 2003). Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS) teknolojisinde, sürücülerin en uygun rotayı seçmelerine yardımcı olan temel bir navigasyon sistemi bulunmaktadır. Örneğin, Barth vd. (2007) tarafından tasarlanan bir navigasyon aracı, yakıt tüketimini ve araç emisyonlarını minimize etmek için özellikle geliştirilmiştir. Ayrıca trafik sıkışıklığının engellenmesi çok daha az durup kalkma eylemine dolayısıyla daha az yakıt tüketimine ve emisyonu da sebep olur.

Liu (2012) akıllı şebekelerdeki KAA uygulamalarını gözden geçirerek şebeke izleme ve yönetimindeki gelişmelerin altını çizmiş ve büyük ölçekli dağıtım ve birlikte çalışabilirlik konusundaki zorluklara da dikkat çekmiştir. Garcia-Hernández vd. (2007) , KAA'lar ve uygulamaları hakkında kapsamlı bir araştırma yürütmüş; sensör teknolojisi ve ağ protokollerindeki önemli ilerlemelere dikkat çekmiş, enerji yönetimi ve veri işlemede kalıcı sorunları izah etmiştir.

KAA tabanlı trafik ışık kontrolü adlı çalışmada kullanılan KAA'nın gerçek zamanlı trafik bilgilerini almadaki verimliliği araştırılmıştır (Tubaishat, Qi, Shang, & Shi, 2008). İlk analiz, trafik ışıklarına yaklaşan araçları tespit etmek için tek bir sensör kullanılarak yapılmıştır. İkinci bir analizde, kuyruk uzunluğunu hesaplamak için her trafik şeridine iki sensör yerleştirilmiştir. Sonuçlar, bir sensörün kullanılmasının en iyi performansı elde etmek için yeterli olmadığını göstermektedir.



Şekil 3. Akıllı ulaşım sistemlerine dair bir örnek

Aynı trafik şeridinde yerleştirilen iki sensörün arasındaki mesafe de, trafik akışı üzerinde büyük bir etkiye sahip olmamıştır (Cheung, ve diğerleri, 2005). Başka bir çalışmada, sensör tabanlı Trafik Işık Kontrolcüsü Yeşil Işık Bölge Simülatörüne uygulanmış ve sensör kullanılmayan gerçek bir TLC ile karşılaştırılmıştır (Cheung, Ergen, & Varaiya, 2005). Sonuçlar, önerilen KAA tabanlı TLC'nin iyi performans gösterdiğini ancak trafik ışıklarında kuyrukta bulunan araçların sayısını tam olarak elde edemediğini göstermiştir. Aslında, pek çok sensörün kullanılması, bir kavşakta trafiğin tam ve eksiksiz bir şekilde yönetilmesini garanti edemez.

Başka bir çalışmada KAA'lara dayalı merkezi olmayan yeni bir TLC önerilmiştir (Tubaishat, Shang, & Shi, 2007). Ana amacı, trafik ışıklarında araç akışını en üst düzeye çıkaran ve trafik ışıklarında bekleme süresini azaltarak yol takip sistemini geliştirmektir. Her kavşak, yol boyunca dağılmış kablosuz sensörlerden bilgi alan ve trafik akış modelini belirleyen bir Kesişme Kontrol Birimi ile tanımlanır (Chen, Chen, Chen, & Tu, 2006).

Gerçek zamanlı yol izlemeyi iyileştirmek için KAA'ya ek olarak bulanık mantık kullanılabilir. Örneğin, Zou ve diğerlerinin önerdiği yaklaşımda, bulanık mantık dinamik ve gerçek zamanlı bir trafik kontrolüne izin verirken kablosuz bir sensör ağı trafik bilgilerini toplar. Algılanan araç sayısına göre, trafik akışını yönetmek için bir profil uygulanır. Performans, Ortalama Bekleme Süresi hesaplanarak belirlenir ve sonuçlar, kablosuz sensör

ağının hızlı bir şekilde trafik bilgilerini toplamadaki yeteneklerini göstermiştir (Zou, Yang, & Cao, 2009).

Huang ve diğerlerinin çalışmasında, yol kavşakları hakkında bilgi toplamak için bir kablosuz algılayıcı ağı önerilmiştir (Huang, Tang, Deng, & Zhao, 2020). Bu bilgiler, trafik hakkında istekte bulunan kullanıcılara iletilebilir. Nitekim, şoför, cep telefonu ile ilgilenen bir bölgenin trafik bilgilerini alabilir.

Dissanayake vd. (2009) temel amacı, bir algoritmayı tasarlamak ve uygulamak ve çeşitli simülasyonlar yoluyla trafik yönetimini ve kontrolünü değerlendirmektir. Önerilen sistem hareket halindeki demirli/metalik nesneleri KAA vasıtasıyla tespit edebilmektedir, hatta bir kavşaktaki, trafik ışığının yeşil ve kırmızı yanma süresini optimum hesaplayabilmektedir. Bu şekilde, sistem trafik sıkışıklığı sorunlarını çözmeyi hedeflemektedir. Bütün durumlarda, sistem doğruluğunu artırmak için birçok sensör düğümünün kullanılması gereklidir. Yine akıllı binalarda enerji yönetimi için KAA'lar kullanılarak enerji tüketimi optimize edilebilir. Bu sistemler, bina içindeki sıcaklık, nem ve enerji tüketimi gibi parametreleri izleyerek enerji tasarrufu sağlar ve kullanıcı konforunu artırır. Bu tür uygulamalar, binaların enerji verimliliğini artırarak çevresel etkileri minimize eder (Kandris, Nakas, Vomvas, & Koulouras, 2020).

1.3. KAA'lardaki Güncel Zorluklar

Kablosuz algılayıcı ağlarda halihazırda araştırmacıların üzerinde yoğunlukla çalıştığı güncel başlıklar şunlardır: Hizmet kalitesi, ağ ömrü, hata toleransı, ölçeklenebilirlik ve güvenlik. Aşağıda bu zorluklar ve detayları ele alınmıştır.

1.3.1. Hizmet Kalitesi (Quality of Service, QoS)

KAA'lardaki hizmet kalitesi ile ilgili parametre hizmetin türüne bağlı olarak değişmekle birlikte ağlardaki tanımlanmış performans ölçütünü ifade eder, Dolayısıyla her uygulama için herkese uyan tek bir QoS çözümü olması mümkün değildir. Örneğin bazı durumlarda gecikmenin az olması istenirken bazı durumlarda yüksek bant genişliği bazen de güvenlik önemli hale gelebilmektedir. Dahası, bazı durumlarda gecikme enerji tüketiminden bile daha önemli olabilir (Akyildiz & Vuran, 2010). Bazı durumlarda arada sırada sadece bir paket teslim etmek yeterliyken bazen de belirli periyotlarda sürekli paket iletimi önem arz eder. Bununla beraber QoS kriteri güvenlik olduğunda genelde daha yüksek

enerji tüketimi ve daha uzun gecikmeler pahasına bu sağlanır. Ama böyle bir takas, KAA'lar gibi zaten kaynak açısından kısıtlı ağlar için uygun ve verimli olmayacaktır (Pathak, Al-Anbagi, & Hamilton, 2022). Dolayısıyla ilgili ağın hizmet kalitesi kriterlerini karşılayacak şekilde tasarlanması KAA'lardaki güncel zorluklardandır.

1.3.2. Ağ Ömrü

Literatürde KAA'larla ilgili en güncel araştırma konuları arasında yer alan ağ ömrü meselesi, sensör düğümlerinin kısıtlı işlem gücüne bağımlı olmalarından kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla KAA'lardan mümkün olduğunca fazla hayatta kalması ve hedeflenen verileri toplaması beklenir. Literatürde KAA'ların ağ ömrünü uzatmayı hedefleyen yüzlerce çalışma bulunabilir. Ağ ömrü enerji verimliliğinin ölçüsüdür, sensör düğümleri pille çalıştırıldığından, KAA protokolleri sistem ömrünü en üst düzeye çıkarmak için enerji açısından verimli olmalıdır. Ağ ömrü ile ilgili bazen son düğüm ölene kadarki ömür, bazen de ilk düğüm ölene kadarki süre gösterge olarak alınır (Karl & Willig, 2007). Bu tezin ortaya koyduğu çalışmada da ana motivasyon ağ ömrünün uzatılması ile ilgilidir.

1.3.3. Hata Toleransı

Sensörler, çevredeki fiziksel koşullar nedeniyle veya enerjileri tükendiğinde arızalanabilir. Mevcut sensörleri değiştirmek pratik olmayabilir; buna karşılık, KAA, ciddi olmayan arızaların uygulamayı engellemeyecek şekilde gizlenmesi için hata toleranslı olmalıdır (Fahmy, 2023). Başka bir deyişle bir düğümden alınan veriler kaybedildiğinde veya düğüm hasar gördüğünde ihtiyaç duyulan verilerin sağlam olan diğer düğümlerden karşılanması beklenir. Ağdaki düğümlerden bir kısmı başarısız olduğunda, ortam erişim kontrolü (MAC) ve yönlendirme protokolleri veri toplamaya devam etmek için BS'ye bağlantılar ve rotalar oluşturulmasını sağlamalıdır. Bu, enerji tüketimini azaltmak için mevcut bağlantılardaki iletim güçlerini ve sinyalleme hızını aktif olarak ayarlamayı veya paketleri daha fazla enerjinin mevcut olduğu ağ bölgelerinden yeniden yönlendirmeyi gerektirebilir (Al-Karaki & Kamal, 2004). Bunu aşabilmek için, normalde gerekli olandan daha fazla düğüm kullanılarak bazı düğümler yedek düğüm şeklinde konuşlandırılır (Karl & Willig, 2007). Hata toleransının başarılması, SPIN protokolünde olduğu gibi veri çoklama yoluyla da elde edilebilir (Wang & Xiao, 2006). Ancak, veri çoğaltma da enerji

gerektirdiğinden enerji verimliliğini sağlamak için uygulamaya özgü olarak bir iyi bir denge kurulması gerekir.

1.3.4. Ölçeklenebilirlik

Ağın boyutundan bağımsız olarak performans özelliklerini sürdürme becerisine ölçeklenebilirlik denir (Karl & Willig, 2007). Ağdaki düğüm sayısı bazen yüzlerce bazen binlerce olabilir. Bu durum, hiç şüphesiz veri yoğunluğunu ve ağ trafiğini önemli ölçüde artırır. Düğüm sayısı arttıkça, düğümlerden toplanan verinin yönetilmesi ve yönlendirilmesi de gitgide zorlaşır. Ölçeklenebilir olmayan bir ağda, veri kayıpları yahut ağ tıkanıklıkları hatta gecikmeler mümkün hale gelir. Bu nedenle, ölçeklenebilirlik sağlamak için topolojinin sınırlı bilgisiyle çalışan tamamen dağıtık protokollerin geliştirilmesi gerekir (Akyildiz & Vuran, 2010). Çok sayıda düğümden oluşan bir ağda, tek tek sensör düğümlerinin manuel yapılandırılması, bakımı ve onarımı mümkün olmayacaktır, bu nedenle kendi kendini yönetme ve kendi kendini yapılandırma desteği gerekecektir (Dargie & Poellabauer, 2010). Ayrıca ölçeklenebilirlik, ağ için dayanıklılık ve hata toleransı sağlar. KAA ölçeklenebilirliği, donanım ve yazılımın entegre bir görünümünü dikkate almalıdır. Donanım için ölçeklenebilirlik meseleleri, sensörlerin hassasiyetini ve aralığını, radyonun haberleşme bant genişliğini ve güç tüketimini içerirken yazılım meseleleri arasında komut dağıtımının ve veri aktarımının güvenilirliği, büyük hacimli verilerin yönetimi ve verileri analiz etmek için ölçeklenebilir algoritmalar yer alır (Fahmy, 2023).

1.3.5. KAA'larda Güvenlik

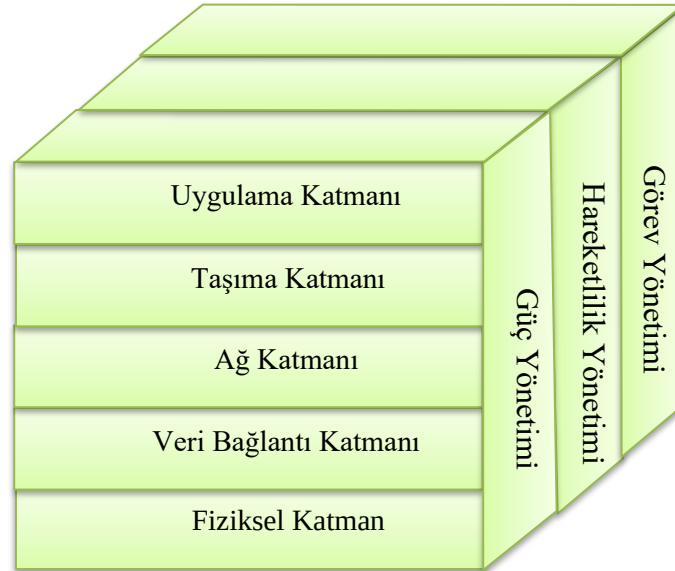
KAA'lar hassas bilgiler topladığından, diğer kablosuz ağlar gibi, güvenlik tehditlerine karşı savunmasızdır (Kobo, Abu-Mahfouz, & Hancke, 2017). Bu sebeple KAA'larda, bazı temel güvenlik gereksinimleri tamamlanmalıdır. Bu nitelikler: Veri doğrulama, veri gizliliği, veri Bütünlüğü, kullanılabilirlik ve yedeklilik (IEEE 802.15 Work Group and others, 2006; Christin, Reinhardt, Mogre, & Steinmetz, 2009; Modares, Salleh, & Moravejosharieh, 2011). Sensör düğümlerinin uzaktan ve gözetimsiz çalışması, kötü niyetli izinsiz girişlere ve saldırılara maruz kalmalarını artırır. Ayrıca kablosuz iletişim, düşmanın sensör aktarımlarını gizlice dinlemesini kolaylaştırır (Dargie & Poellabauer, 2010). KAA saldırıları hedef odaklı (pasif ve aktif), performans odaklı (dış ve iç) ve katman odaklı olarak sınıflandırılabilir. Pasif saldırılar, trafik analizi veya mesaj içeriklerinin ifşası dahil olmak üzere haberleşmeyi

dinleyerek gerçekleştirilir. Aktif saldırılar ise saldırganların veriyi değiştirerek ağ işleyişini kesintiye uğratması ile gerçekleşir. Performans odaklı saldırılar, dışarıdan kaynakları tüketen servis dışı bırakma (DoS, denial of service) saldırıları ve içeriden kötü niyetli düğümlerin ağ bozması şeklindedir. Katman odaklı saldırılar ise ağ yığınının fiziksel, veri bağlantı, ağ, taşıma ve uygulama katmanlarını hedef alır. Kaynak sınırlamaları, KAA’karda güvenlik önlemlerini zorlaştırır ve bu nedenle 'düşük kaynak' kriptografik önlemler üzerinde yoğun araştırmalar yapılmaktadır (Kobo, Abu-Mahfouz, & Hancke, 2017).

Dağıtık sistemler için saldırıları önleyen veya bu tür saldırıların kapsamını ve hasarını kontrol eden çok sayıda teknik ve çözüm mevcut olsa da, bunların birçoğu önemli hesaplama, iletişim ve depolama gereksinimlerine neden olur ve bunlar genellikle kaynakları kısıtlı sensör düğümleri tarafından karşılanamaz (Dargie & Poellabauer, 2010). Sonuç olarak sensör ağlarında güvenlik kritik öneme sahip olmaya devam etmektedir.

1.4. KAA Protokol Yığını

Kablosuz algılayıcı ağ mimarisi genel olarak OSI referans modeline benzer beş katmandan oluşur (Shyama & Pillai, 2018). Ancak OSI referans modeli ekstra olarak sunum ve oturum katmanlarını da içerir. KAA protokol yığını katmanları Şekil 4’te verilmiştir.



Şekil 4. KAA Protokol Yığını

Bu katmanlar: Uygulama, Taşıma, Ağ, Veri bağlantısı ve Fiziksel Katmandır. Ayrıca üç çapraz uzay içerir: güç yönetimi, hareketlilik yönetimi ve görev yönetimi.

Uygulama katmanı kullanıcıya en yakın katman olup algılama görevlerini yerine getirecek yazılımları barındırır. Taşıma katmanı veri akışını içerirken, ağ katmanı da bu verileri yönlendirir. Fiziksel katman ise modülasyon, iletim ve sinyal algılama vs. yöntemleri içerir ve en alt katmandır. Güç, hareketlilik ve görev yönetimi düzlemleri, sensör düğümleri arasındaki güç, hareket ve görev dağıtımını denetleyerek, algılama işlevlerini koordine eder ve genel güç tüketimini azaltır (Venugopal, Shiv Prakash, & Kumaraswamy, 2020). Tablo 1’de her katmanda güç tüketimine neden olan ana işlemler verilmiştir (Bagwari, Tomar, Bagwari, Barbosa, & Sastry, 2023). Buna göre fiziksel katmanda veri iletimi, veri bağlantı katmanında çakışma, ağ katmanında rotalama, taşıma katmanında tıkanıklık, uygulama katmanında da veri artıklığı enerji tüketimine sebep olan ana işlemlerdendir.

Tablo 1. Her katmanda güç tüketimine neden olan ana işlemler

No	Katmanlar	İşlem
1	Fiziksel katman	Veri İletimi
2	Veri bağlantı katmanı	Çakışma
3	Ağ katmanı	Rotalama
4	Taşıma katmanı	Tıkanıklık
5	Uygulama katmanı	Veri artıklığı

1.4.1. Fiziksel Katman

Kablosuz algılayıcı ağlarında düğümlerin sayısı ve konumu, pillerin yeniden şarj edilmesini veya değiştirilmesini zorlaştırır, bu nedenle enerji tüketimi önemli bir tasarım sorunudur. Enerji kaybını en aza indirmek için donanım, protokoller ve algoritmalar gibi tüm sistem tasarımı seviyelerinde çalışmalar yapılmıştır (Fahmy, 2023).

Fiziksel (PHY) katman, bit akışlarını kablosuz kanal üzerinden iletişim için uygun sinyallere dönüştürmekten sorumludur ve frekans seçimi, taşıyıcı frekans üretimi, sinyal algılama, modülasyon ve veri şifrelemesi gibi görevleri yerine getirir (Akyildiz & Vuran, 2010). Fiziksel katmanda, kablosuz haberleşmede enerji kaybına katkıda bulunan iki ana bileşen vardır ki bunlar kanaldan kaynaklanan kayıp ve iletişim devrelerini çalıştırmak için sabit enerji maliyeti olarak ifade edilebilir. (Heinzelman, Chandrakasan, & Balakrishnan,

2002). İletişimin güvenilirliği, anten hassasiyeti ve alıcı-verici devresi gibi donanım özelliklerine de bağlıdır. Kablosuz sensör ağlarının avantajları arasında dağıtım kolaylığı ve altyapıya bağımlı olmayan ağ oluşturma gibi faktörler bulunur. Ancak, kablosuz iletişim sınırlı iletişim aralığı, sık hatalar ve parazit gibi zorluklar da getirir. Uzun mesafeli kablosuz iletişim, enerji tüketimi ve uygulama karmaşıklığı açısından pahalı olabilir. Sensör ağları için fiziksel katman tasarlanırken, enerji tüketimini en aza indirme, bozulma, saçılma, gölgelenme, yansıma, kırınım, çoklu yol ve solma etkileri önemli hususlardır (Akyildiz & Vuran, 2010).

1.4.2. Veri Bağlantı Katmanı

Kablosuz ortam birden fazla ağ cihazı tarafından paylaşılmalıdır, bu nedenle ortama erişimi kontrol etmek için bir mekanizma gereklidir. Dolayısıyla bu mekanizma, veri bağlantı katmanı tarafından gerçekleştirilir (Dargie & Poellabauer, 2010). Veri bağlantı katmanı, veri akışı çoklama, veri çerçevelerinin algılama ve ortam erişimini (MAC) yönetme ve hatalarının kontrolünü ele alır. İletişim ağı içinde güvenilir noktadan noktaya ve noktadan çok noktaya bağlantıları garanti eder (Akyildiz & Vuran, 2010). Bir KAA'nın güç tasarrufu ve veri merkezli yönlendirme ile başa çıkması için, belirli bir MAC protokolü gereklidir (Fahmy, 2023). Birincisi, çok sayıda düğüm arasında iletişim bağlantıları kurmayı ve ağın kendi kendini organize etme yeteneklerini sağlamayı içeren bir ağ altyapısı oluşturmaktır. İkinci hedef, tüm düğümler arasında iletişim olanaklarını adil ve verimli bir şekilde paylaşmaktır.

1.4.3. Ağ Katmanı

Ağ katmanının işlevi rotalamayı gerçekleştirmektir. Ağ katmanı her çerçevenin mantıksal adresini kontrol eder ve çerçeveyi bir yönlendirme tablosuna göre bir sonraki yönlendiriciye iletir ve her mantıksal adresi (ad adresi) fiziksel bir adrese (MAC adresi) çevirmekten sorumludur (Elahi & Cushman, 2023). Ağ katmanı protokolünün bir örneği İnternet Protokolüdür (IP).

Akyildiz, sensör düğümlerinin sınırlı iletişim menzili nedeniyle verilerin uzak bir veri merkezine (sink) iletilmesi için ara düğümler üzerinden çok duraklı kablosuz rotalama protokollerine ihtiyaç olduğunu belirtir. Ayrıca, rotalama protokollerinin veri merkezli olması gerektiğini ve kullanıcıların belirli düğümlerden ziyade belirli fenomenlerin

özelliklerini sorguladığını vurgular. Fahmy, ağ katmanının enerji verimliliği, veri merkezlilik ve konum farkındalığı gibi temel prensiplerle tasarlanması gerektiğini, basit yönlendirme yöntemlerinin (örneğin flooding ve gossiping) enerji israfı ve veri fazlalığı gibi sorunlara yol açabileceğini ifade eder. İdeal veri yayılımı, verilerin en kısa yol üzerinden iletilmesini sağlarken, bu yöntemin takibi zor ve enerji maliyeti yüksektir. Dargie ise, büyük ölçekli KAA uygulamalarında düğümlerin hem kendi verilerini yaymaları hem de diğer düğümler için iletici (relay) olarak hizmet vermeleri gerektiğini belirtir. Rastgele dağıtılan düğümlerin kendiliğinden organize olmasının ve komşularını tanımasının önemine dikkat çeker. Sonuç olarak, KAA'ların etkin ve verimli çalışmasını sağlamak için ağ katmanının enerji verimliliği, veri merkezlilik ve çok atlamalı iletişim gereksinimlerine uygun olarak tasarlanması gerektiği görülmektedir (Fahmy, 2023; Akyildiz & Vuran, 2010; Dargie & Poellabauer, 2010).

1.4.4. Taşıma Katmanı

Taşıma katmanının görevi, verilerin düğümler arasında güvenilir bir şekilde iletilmesini sağlamaktır. Paket iletimi sırasında oluşan tıkanıklık, bu katmandaki birincil güç tüketimi kaynağı olup akış kontrolü, çoklama vb. de bu katmandaki güç tüketiminden sorumludur (Bagwari, Tomar, Bagwari, Barbosa, & Sastry, 2023). KAA'larda taşıma katmanı protokolünün temel hedefleri olarak tıkanıklık kontrolü, güvenilir taşıma, çoklama (multiplexing) sayılabilir. Tıkanıklık nedeniyle oluşan paket kayıpları, güvenilirliği olumsuz etkileyebileceğinden, taşıma katmanında tıkanıklık kontrolü hem ağ verimliliğini artırmak hem de sınırlı sensör kaynaklarını etkin kullanmak adına önemlidir. Ayrıca, güvenilir taşıma, uygulama gereksinimlerine göre sensör düğümlerinden alınan verilerin ve önemli iletilerin, hedef düğümlere doğru ve eksiksiz bir şekilde ulaştırılmasını sağlar. Taşıma katmanı aynı anda farklı uygulamaların aynı ağ üzerinden hizmet verebilmesi için uygulama ve ağ katmanları arasında (de)multiplexing işlevi görerek, veri akışlarının etkin bir şekilde yönetilmesine olanak tanır (Akyildiz & Vuran, 2010).

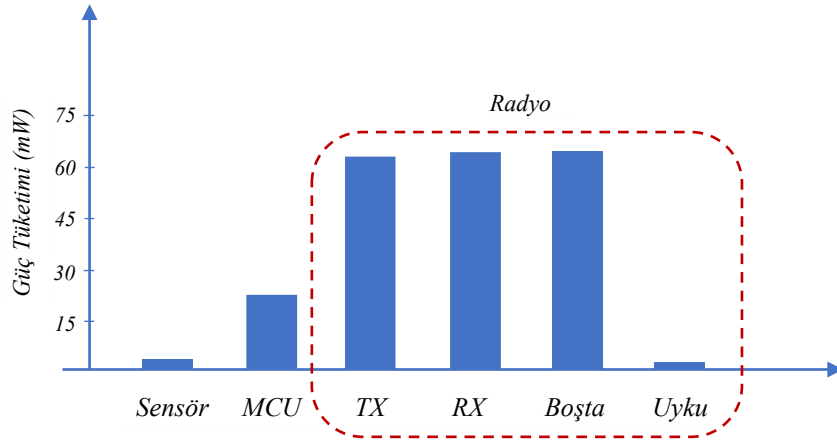
1.4.5. Uygulama Katmanı

Uygulama katmanı, ana uygulamanın yanı sıra çeşitli yönetim işlevlerini de içerir. Her uygulama için özel olan uygulama koduna ek olarak, sorgu işleme ve ağ yönetimi işlevleri de bu katmanda bulunur (Akyildiz & Vuran, 2010). Gereksiz verilerin ortadan kaldırılması,

sıkıştırılması, belirlenen alıcıya gönderilmesi ve dolayısıyla güç tüketimi bu katmanda gerçekleşir. (Bagwari, Tomar, Bagwari, Barbosa, & Sastry, 2023).

1.5. Rotalama Protokolleri

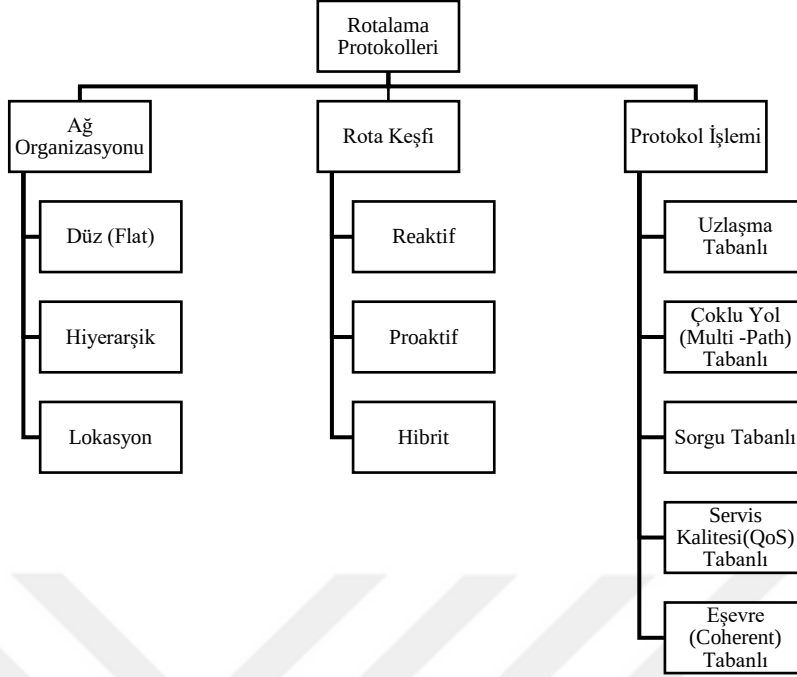
Kablosuz algılayıcı ağlardaki sensör düğümleri, çevresel verileri toplar ve bu verileri diğer düğümlere veya merkezi bir baz istasyonuna (BS) iletir. Düğümlerin enerji tüketimi; sensörün veri toplaması sırasındaki tüketimi, işlemcinin veri işleme sırasındaki tüketimi ve radyonun tüketimi olarak ifade edilebilir. Radyonun enerji tüketimi veri gönderme, veri alma ve idle durumuna göre farklılık gösterir. Bu bileşenler arasında veri iletimi en fazla enerji tüketimini gerektirir. Bu durum Şekil 5'te açıkça görülmektedir (Akyildiz & Vuran, 2010). Bu nedenle, veri iletiminin optimize edilmesi, ağın enerji verimliliğini artırmak için kritik öneme sahiptir (Ullah, ve diğerleri, 2024). İletişim modeli bölümünde ifade edileceği üzere veri iletimi sırasında sensör düğümlerinin harcadığı enerji, iletim mesafesi ve veri miktarı ile doğrudan ilişkilidir. Dolayısıyla uzak mesafeye veri göndermek enerji tüketimini artıracaktır. Bazı durumlarda bu durumu aşabilmek adına çok duraklı rotalama önerilir. Ayrıca KAA'lara ilişkin enerji tasarrufuna ek olarak başka başarımları da gerektiren uygulamalar olabilir. Bütün bu beklentiler farklı rotalama algoritmalarını zorunlu hale getirir.



Şekil 5. Bir MicaZ düğümünün güç tüketiminin dökümü (Akyildiz & Vuran, 2010)

Bu anlamda KAA'ların hangi rotalama algoritmasını kullandığı, düğümlerin hangi sırayla yahut hangi düğüme veri gönderip alacağı enerji tüketimini doğrudan ilgilendirir. Literatürde enerji tüketimini azaltmayı, ağ ömrünü artırmayı ve alandan toplanan veriyi sağlıklı şekilde BS'ye iletmeyi hedefleyen pek çok rotalama protokolü bulunmaktadır. Araştırmacılar rotalama protokollerini değerlendirme kriterlerine göre değişik şekilde kategorize etmiştir (Al-Karaki & Kamal, 2004; Dargie & Poellabauer, 2010; GhasemAghaei, 2008). Bunlardan daha teferruatlı olan Karaki ve Kamal ile Dargie ve Poellabauer'in çalışmalarında ele aldıkları şekliyle rotalama protokolleri Şekil 6'daki gibi tasnif edilmiştir.

Bu kapsamda KAA'lardaki rotalama algoritmaları, ağ organizasyonuna göre düz (flat) tabanlı rotalama, hiyerarşi tabanlı rotalama ve konum tabanlı rotalama olarak ayrılabilir. Düz tabanlı rotalamada, tüm düğümlere eşit roller veya işlevler atanır. Hiyerarşi tabanlı rotalamada, düğümler arasında hiyerarşik düzen bulunur, yani düğümler farklı işlevler üstlenebilirler. Konum tabanlı rotalamada, sensör düğümlerinin konumları kullanılmak suretiyle rotalama söz konusudur. Rotalama protokolleri, kaynaktan hedefe giden rotayı nasıl bulduğuna bağlı olarak proaktif, reaktif ve hibrit olmak üzere üç kategoriye ayrılabilir. Proaktif protokollerde, tüm rotalar ihtiyaç duyulmadığı halde önceden hesaplanırken, reaktif protokollerde rotalar talep üzerine hesaplanır. Hibrit protokoller ise proaktif ve reaktif protokollerinin ikisinin beraber kullanıldığı protokollerdir. Rotalama protokolleri protokol işlemine göre uzlaşma tabanlı, çok yollu, sorgu tabanlı, Hizmet kalitesi (QoS) tabanlı ve eşevre tabanlı rotalama olarak kategorize edilebilir. Uzlaşma tabanlı protokoller, gerçek veri aktarımları gerçekleşmeden önce komşu sensör düğümleri arasında müzakere mesajlarının alışverişine dayanarak artık veri iletimini azaltmayı amaçlar. Çok yollu protokoller, aynı anda birden fazla rota kullanırken sorgu tabanlı yönlendirme protokolleri alıcı tarafından başlatılır, yani sensör düğümleri hedef düğüm tarafından verilen sorgulara yanıt olarak veri gönderir. QoS tabanlı yönlendirme protokollerinin amacı düşük gecikme, düşük enerji tüketimi veya düşük paket kaybı gibi belirli bir Hizmet Kalitesi (QoS) metriğini karşılamaktır (Dargie & Poellabauer, 2010). Eşevre tabanlı protokoller, düğümün elde ettiği verileri asgari düzeyde işleyerek toplayıcılara göndermesini esas alır.



Şekil 6. Rotalama Protokolleri (Al-Karaki & Kamal, 2004)

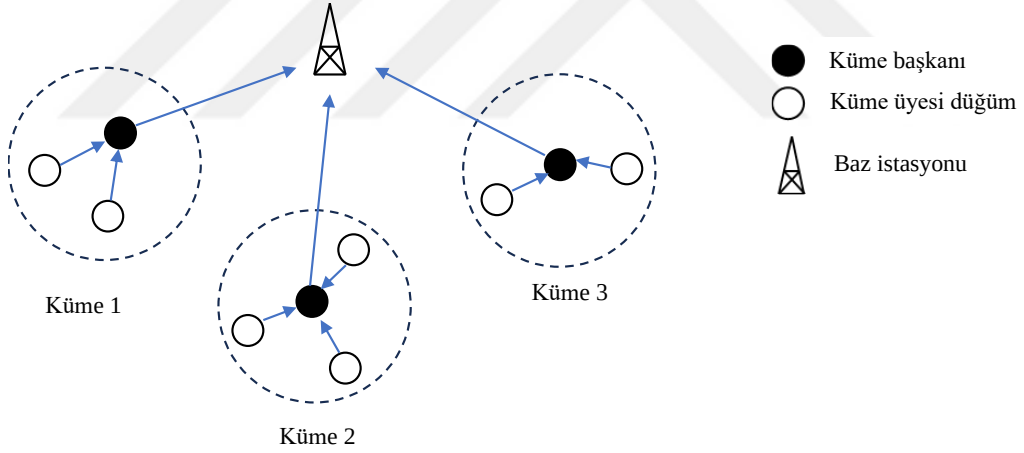
1.5.1. Ağ Organizasyonu

Ağ organizasyonu yönünden rotalama protokolleri üç başlıkta ele alınmaktadır: Düz (Flat) rotalama, hiyerarşik ve lokasyon tabanlı rotalama.

Düz tabanlı (flat-based) rotalamada düğümler arasında herhangi bir hiyerarşi yer almaz. Yani tüm düğümlerin eşit öneme sahip olduğu ve düğümlerin görevlerinin eşit olarak dağıtıldığı bir rotalama yaklaşımıdır. SPIN (1999), Directed Diffusion (2000) ve Rumor Routing (2002) gibi protokoller, bu yaklaşımın farklı uygulama ve optimizasyon yöntemlerini sunar. Örneğin SPIN ve Directed Diffusion yöntemlerinin veri müzakeresi ve gereksiz verilerin ortadan kaldırılması yoluyla enerji tasarrufu sağladığı gösterilmiştir. Ayrıca SPIN algoritmasının pek çok türevi mevcuttur.

Hiyerarşik tabanlı rotalama, enerji verimliliği ve ağ ömrünü uzatmak amacıyla düğümler arasında hiyerarşik bir mekanizma kullanır. Bu bazen kümelemeli bazen zincir şeklinde bazen de ağaç formasyonunda olabilir. Özellikle ölçeklenebilirlikleri ve aşırı yüke karşı dirençleri ile karakterize edilen hiyerarşik yönlendirme protokolleri, kablosuz sensör ağlarında avantajlar göstermiştir (Singh, Kumar, & Singh, 2017; Akkaya & Younis, 2005). Hiyerarşik yönlendirme protokolleri için temel bir teknik olan kümeleme (Akyildiz &

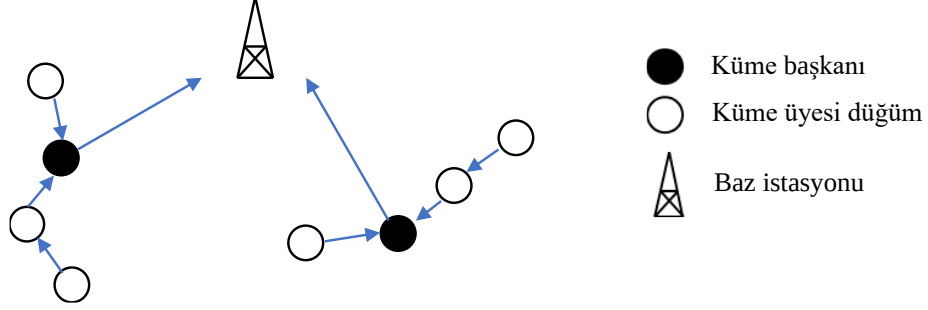
Vuran, 2010), ağın kümelere bölünmesini içerir ve böylece ölçeklenebilirlik ve enerji verimliliği artırılır. Her küme, ağın ömrünü ve verimini artırmak için belirtilen yöntemlerle düğümler arasından seçilen belirlenmiş bir Küme Başkanı (KB) tarafından denetlenir. KB'ler küme içi iletişimi yönetir ve KB olmayan düğümler kendi KB'lerine veri iletir. KB'ler kümelerinden gelen verileri toplar ve BS'ye iletir. Şekil 7'de hiyerarşik kümelemeli yaklaşıma ait bir örnek verilmektedir. Kümeleme tabanlı algoritmalar iki modda uygulanabilir: merkezi ve dağıtılmış (Heinzelman, Chandrakasan, & Balakrishnan, 2000). Merkezi kümeleme algoritmaları, optimum kümeleri belirlemek ve ardından düğümlere bildirmek için düğüm konumu ve merkezi bir noktadaki enerji gibi bilgileri toplar. Buna karşılık, sınırlı enerji ve bilgi işlem kaynaklarına sahip düğümler tarafından yürütülen dağıtılmış kümeleme algoritmaları, konum ve enerji bilgisi toplamadan kümeler oluşturur. Dağıtılmış kümeleme algoritmaları maliyet ve esneklik avantajları sunarken, sınırlı kaynakların kısıtlamaları içinde etkili bir şekilde çalışabilme yeteneğine sahip olmalıdır (Gangal, Cinemre, & Hacıoglu, 2024).



Şekil 7. Hiyerarşik kümeleme tabanlı rotalama mimarisi

Hiyerarşik rotalamanın bir çeşidi de zincir tabanlı rotalamadır. Şekil 8'de zincir tabanlı yaklaşıma ait bir örnek gösterilmiştir. Bu yaklaşımda düğümler zincir şeklinde rotalar oluşturularak verileri bir zincir liderine iletirler. PEGASIS (Power-Efficient Gathering in Sensor Information Systems) tüm düğümleri veri iletimi ve toplama için bir zincir halinde organize eder (Lindsey & Raghavendra, 2002). Veriler, zincir boyunca iletilir ve her düğüm, verilerini bir sonraki düğüme gönderir. PEGASIS'teki bir dezavantaj, paketlerin özellikle zincirdeki uzak düğümlerden gelmesi halinde birleştirilmesi sebebiyle önemli gecikmeler

yaşayabilmesidir. Bu da veri kayıplarına sebebiyet verebilir. Son olarak, baz istasyonuna röle görevi gören düğüm bir darboğaz haline gelebilir. (Dargie & Poellabauer, 2010).



Şekil 8. Zincir tabanlı rotalama yapısına dair bir gösterim

Heinzelman vd. (2000) tarafından önerilen LEACH (Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy) protokolü, hiyerarşi ve kümeleme içeren yaklaşımı ile enerji verimliliğini artırmak ve ağ ömrünü uzatmayı amaçlar. LEACH algoritması, en iyi bilinen ve etkili dağıtık kümeleme algoritmalarından biri olarak durmaktadır. LEACH protokünde, küme başkanları (KB) sensör düğümleri arasından dönüşümlü bir şekilde seçilerek, enerji tüketimi ağ içinde eşit bir şekilde dağıtılır. LEACH, kurulum (set-up) ve steady state (sabit durum) fazı olmak üzere iki faz içerir. Kurulum fazı, KB seçimi, küme oluşumu ve ilgili küme üyeleri için zaman bölmeli çoklu erişim (TDMA) çizelgelerinin atanması gibi temel süreçleri kapsar. Kurulum fazı içerisinde, düğümler KB seçim sürecine aktif olarak katılırlar. Bu, her düğüm tarafından 0 ile 1 aralığında rastgele sayı üretilmesini içerir. Düğümün ürettiği rastgele sayı, önceden tanımlanmış bir eşik değerinin ($T(n)$) altındaysa ilgili düğüm kendisini KB olarak ilan eder.

$T(n)$ değeri Denklem (1)'deki gibi hesaplanır:

$$T(n) = \begin{cases} \frac{P}{1 - P * \left(r \bmod \frac{1}{P}\right)} & \text{eğer } n \in G \text{ ise} \\ 0 & \text{değilse} \end{cases} \quad (1)$$

Burada P , KB olmak isteyen düğümlerin istenen yüzdesini, r mevcut turu ve G ise geçtiğimiz $\frac{1}{p}$ turlarda KB olmamış düğümleri temsil eder.

KB olarak seçilen düğümler, diğer düğümlere KB olduklarına dair bir reklam (ADV) mesajı gönderir. Düğümler, bu mesajın sinyal gücüne bağlı olarak hangi KB'ye katılacaklarına karar verir ve bu KB'ye katıldıklarını belirten bir yanıt mesajı gönderir. KB, her üye düğüm için bir TDMA (Time Division Multiple Access) zaman çizelgesi oluşturur ve bu programı küme üyelerine iletir. Bu, veri iletiminde çakışmayı önlemeye ve düğümlerin uyku moduna geçerek enerji tasarrufu yapmasını sağlar. Steady-state fazında da veri iletimi gerçekleştirilir. Her düğüm, kendisine atanmış zaman diliminde veri gönderir. Diğer zamanlarda ise enerji tasarrufu sağlamak için uyku modunda kalır

Ayrıca LEACH, kümelerden baz istasyonuna gönderilen veri miktarını "sıkıştırmak" için yerel veri füzyonu gerçekleştirir, böylece enerji kaybını daha da azaltır ve sistem ömrünü uzatır (Heinzelman, Chandrakasan, & Balakrishnan, 2000). KB, topladığı veriyi, doğrudan iletişim için tek duraklı bir yöntem kullanılarak iletir. Dolayısıyla seçilen küme başkanları BS'den uzakta olduğunda enerji tüketimi oldukça artacaktır. Düğümlerin gerek küme başkanı seçerken gerekse de kümeler oluştururken ilgili ağa ait global bilgi gerektirmemesi protokolü tamamen dağıtık hale getirir. Bunun yanında, rastgele CH seçimi düşük enerjili düğümlerin CH olmasına neden olabilir, bu da ağ ömrünü olumsuz etkileyebilir. Yine BS'den uzak olan CH'ler daha fazla enerji harcar, bu da eşit olmayan enerji dağılımına yol açar. LEACH'in bir başka dezavantajı, bazı kümelerde CH'nin konumu kümelerin ortasında olabilir ve bazı kümelerde CH'nin konumu kümelerin sınırlarına yakın olabilir. Sonuç olarak, böyle bir senaryoda küme içi iletişim daha yüksek enerji dağılımına yol açar ve sensör ağının genel performansını düşürür (Singh, Kumar, & Singh, 2017). LEACH protokolünün yukarıda izah edilen dezavantajlarını gidermeyi hedefleyen güncel ardılları bulunmaktadır.

LEACH-C (LEACH - Centralized) protokolü merkezi bir mekanizma kullanarak küme başı (CH) seçim sürecini iyileştiren LEACH protokolünün merkezi bir versiyonudur (Heinzelman, Chandrakasan, & Balakrishnan, 2002). Orijinal LEACH'te CH seçimi dağıtık ve rastgele olarak gerçekleştirilirken, LEACH-C, daha iyi kararlar alabilmek için sensör düğümlerinin kalan enerjisi ve coğrafi konumuna dayalı olarak CH seçimlerini kontrol etmek üzere baz istasyonunu (BS) kullanır. LEACH-C'de her sensör düğümünün GPS modülü ile donatılması ve her tur başında konum ve enerji seviyelerini BS'ye iletmesi gerekmektedir. BS, bu bilgiler doğrultusunda daha yüksek kalan enerjiye sahip düğümleri

tercih ederek CH'leri seçer. Bu merkezi yaklaşım, bireysel CH'ler üzerindeki yükü azaltarak genel enerji tüketimini düşürür. Ancak, GPS ve enerji bilgilerinin BS ile paylaşılması sırasında harcanan enerji, özellikle büyük ağlarda protokolün performansını olumsuz etkileyebilir (Heinzelman, Chandrakasan, & Balakrishnan, 2002; Shi, Liu, & Gu, 2012; Gnanambigai, Rengarajan, & Anbukkarasi, 2012). LEACH-C, küçük ölçekli ağlarda iyi performans gösterse de, merkezi kontrol nedeniyle artan yükten dolayı büyük ölçekli ağlarda etkinliği azalır (Shi, Liu, & Gu, 2012). Ayrıca, CH'lerin merkezi veya kümelerin sınırlarına yakın yerleştirilmesi, küme içi iletişim enerji tüketimini artırabilir ve ağ performansını olumsuz etkileyebilir (Dargie & Poellabauer, 2010).

Kurulum fazında her turun başında, her sensör düğümü konumunu ve kalan enerji bilgisini baz istasyonuna (BS) iletir. BS, tüm sensör düğümlerinin ortalama enerjisini hesaplar ve enerji dağılımının dengeli olmasını sağlar. Ortalama enerjiden daha az enerjiye sahip düğümlerin mevcut tur için CH seçim sürecine katılmasına izin verilmez. Ağın ortalama enerjisi E_{avg} aşağıdaki denklemdeki gibi hesaplanır:

$$E_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^N E_i}{N} \quad (2)$$

Burada, E_i her bir düğümün kalan enerjisidir ve N toplam düğüm sayısını temsil eder. BS, enerji ortalamadan daha fazla olan düğümler için, benzetim algoritması kullanarak optimal kümeler oluşturur. CH'lerin seçimi ve kümelerin oluşumu tamamlanınca, BS bu bilgiyi tüm sensör ağına yayımlar. Her sensör düğümü, CH kimliğini alır ve bu kimlik ile kendi kimliği eşleşirse o düğüm CH olur. Eşleşmezse, o düğüm normal düğüm olarak çalışır. LEACH-C, merkezi CH seçimi süreci sayesinde enerji verimliliğini artırır ve düğümler arasındaki enerji dağılımını dengeler (Singh, Kumar, & Singh, 2017).

Handy vd. (2002) tarafından önerilen LEACH DCHS, LEACH protokolünün eşik denkleminde modifikasyon içeren bir türevidir. Her tur başında, her sensör düğümü konumunu ve kalan enerji bilgisini baz istasyonuna (BS) iletir. LEACH-DCHS, sensör düğümlerinin CH seçimi sürecinde deterministik bir yaklaşım uygular. Bu yaklaşımda LEACH'ten farklı olarak $T(n)$ değeri, mevcut enerji seviyesini ve düğümün başlangıç enerjisini dikkate alarak güncellenir. Eşik değeri aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$T(n) = \frac{P}{1 - P * \left(r \bmod \frac{1}{P}\right)} * \frac{E_{n_{\text{current}}}}{E_{\text{max}}} \quad (3)$$

Burada: P , CH olmak isteyen düğümlerin istenen yüzdesini, r mevcut turu, $E_{n_{\text{current}}}$ düğümün mevcut enerjisini, E_{max} düğümün başlangıç enerjisini ifade eder. Düğümün rastgele ürettiği sayı bu eşik değerinden küçükse, CH olarak seçilir. Her turun CH seçimi mevcut enerji seviyelerini dikkate alarak yapıldığından daha iyi bir denge sağlanarak enerji verimliliği elde edilir. Düğümlerin enerji seviyelerine göre CH seçim kararlarının alınması ağ ömrünü uzatır ve düşük enerjili düğümlerin CH olmasının engellenmesi sağlanır. Ancak bu modifikasyon, belirli bir tur sayısından sonra enerjileri oldukça azalan düğümler sebebiyle sıkışmaya yol açabilir. Bunu aşabilmek için Denklem (3), aşağıda verilen Denklem (4)'teki gibi yeniden modifiye edilir:

$$T(n) = \frac{P}{1 - P * \left(r \bmod \frac{1}{P}\right)} * \left[\frac{E_{n_{\text{current}}}}{E_{\text{max}}} + \left(r_s \bmod \frac{1}{p}\right) \left(1 - \frac{E_{n_{\text{current}}}}{E_{\text{max}}}\right) \right] \quad (4)$$

r_s , bir düğümün CH olarak seçilmediği ardışık turlardır; seçildikten sonra 0'a ayarlanır. İkinci modifikasyon sayesinde LEACH-DCHS metodu LEACH'e kıyasla ağ ömrünü %30 artırır ancak sık küme oluşumu durumu algoritmanın performansını düşürür (Singh, Kumar, & Singh, 2017).

Liu vd. (2011) tarafından önerilen ve Genetik algoritmayı (GA) LEACH algoritmasına entegre eden alternatif bir varyant olan LEACH-GA yaklaşımında LEACH'ten farklı olarak ilk turdan önce bir hazırlık aşaması bulunur. Bu aşamada, tüm düğümler başlangıçta CH seçim sürecini gerçekleştirir ve aday küme başkanlarını (CCH), düğüm kimliklerini ve coğrafi konumlarını içeren mesajları baz istasyonuna iletir. Tüm düğümlerden mesajlar aldıktan sonra, baz istasyonu bir tur için gereken toplam enerji tüketimini en aza indirmek için bir genetik algoritma kullanır ve düğümlerin CH olma potansiyelini araştırır. Daha sonra, baz istasyonu tüm düğümlere en uygun T değerini içeren bir reklam mesajı yayar ve bu da sonraki kurulum aşamasında kümelerin oluşumunu kolaylaştırır. Hazırlık aşaması, ilk turda kurulum aşamasından önce yalnızca bir kez gerçekleşir ve sonraki turlar LEACH'e benzer şekilde kurulum ve sabit durum aşamalarına bağlı kalır. Çeşitli baz istasyonu konumlarında LEACH'e kıyasla ağ ömrünü artırmasına rağmen, bu yaklaşım

ölçeklenebilirlik ve mesaj yüküyle ilgili sınırlamalar sergiler. Ayrıca, geliştirilmiş LEACH (I-LEACH) algoritması CH seçim sürecinde kalan enerji, komşu düğüm sayısı ve düğümün baz istasyonuna olan uzaklığını dikkate almaktadır (Beiranvand, Patooghy, & Fazeli, 2013). I-LEACH, temel LEACH ile karşılaştırıldığında ağ ömründe %55'lik bir iyileştirme ve eş zamanlı olarak enerji tüketiminde %59'luk bir azalma sunarak dikkate değer bir iyileştirme gösterir. Ancak, bu protokolün bu iyileştirmeleri elde ederken iletim maliyetlerini hesaba katmadığını ve artan hesaplama yükü nedeniyle artan karmaşıklık sergilediğini belirtmek önemlidir (Singh, Kumar, & Singh, 2017; Al-Shalabi, Anbar, Wan, & Khasawneh, 2018).

Ayrıca, Vice-LEACH (V-LEACH), diğer düğümlere göre artan enerji tüketiminden kaynaklanan erken CH ölmesini önlemek için bir mekanizma sunar (Sasikala, Sangameswaran, Aravindh, & others, 2015). V-LEACH'e göre, belirli bir düğüm en düşük enerji seviyesine ulaştığında, CH bir yardımcı CH (Vice CH veya VCH) seçer ve VCH kimliğini küme içindeki diğer tüm düğümlere iletir. Daha sonra, normal düğümler veri iletimini önceki CH yerine standart düğüm rolünü üstlenen VCH'ye yönlendirir. V-LEACH, yardımcı bir CH'nin stratejik seçimi yoluyla ağ ömrünü önemli ölçüde uzatır, tüm ağda enerji tasarrufu sağlar ve baz istasyonuna veri iletim verimliliğini artırır. V-LEACH baz istasyonuna güvenilir paket teslimatını sağlamak için dikkate değer bir yetenek gösterir. Ancak, bu başarının iletim maliyetleri için açık bir değerlendirme yapılmadan elde edilmesi dikkat çekicidir (Al-Shalabi, Anbar, Wan, & Khasawneh, 2018). Çoğu LEACH çeşidi dinamik, olasılıklı ve dağıtılmış kümeleme yaklaşımlarını benimsediğinden, optimum küme sayısının sağlanması belirsizliğini korumaktadır. Bu zorluğa yanıt olarak, CH reklamlarının sayısını kısıtlayarak rastgeleliği azaltma özel amacıyla LEACH-MAC protokolü tanıtılmıştır (Batra & Kant, 2016). Hem LEACH hem de LEACH-DCHS ile karşılaştırıldığında operasyonel ömrü boyunca üstün performans gösteren LEACH-MAC, yine de enerji hesaplamalarından ve ek mesaj yükünden kaynaklanan karmaşıklık endişeleriyle boğuşmaktadır (Singh, Kumar, & Singh, 2017). Bu varyantların ötesinde, belirli LEACH uyarlamaları merkezi yaklaşımlar kullanarak sapma göstermektedir (Daanoun, Abdennaceur, & Ballouk, 2011; Gangal, Cinemre, & Hacıoglu, 2024).

Lokasyon tabanlı rotalama, düğümlerin coğrafi konum bilgilerini kullanarak veri iletimi kararlarının alındığı bir tekniktir. Bu yöntemde, algılayıcı düğümleri, hem kendi konumlarını hem de hedef düğümlerin konumlarını bilir ve bu bilgileri kullanarak veri iletimini gerçekleştirir. Lokasyon tabanlı rotalamada, kaynak düğümden veri paketleri tek bir hedef düğüme gönderiliyorsa unicast, çoklu hedeflere gönderilmesi durumu da multicast

şeklinde basitçe ifade edilebilir. Bunların dışında paketler belirli bir coğrafi bölgedeki tüm düğümlere (geocasting) yönlendirilebilir. Bu sayede, ağdaki trafik yükü dengelenir ve enerji tüketimi optimize edilir. Yönlendirme işlemi, ağın topolojik yapısına göre değil, coğrafi bilgilerine göre yapıldığından, yönlendirme tablolarının tutulması veya uçtan uca yolların önceden belirlenmesi gerekmez. Bu da, özellikle büyük ölçekli ve yoğun ağlarda, kontrol mesajları ihtiyacını azaltır ve genel ağ performansını artırır (Fahmy, 2023; Dargie & Poellabauer, 2010)

1.5.2. Rota Keşfi

Rota keşfi protokolleri üç başlıkta ele alınmıştır. Bunlar: Reaktif, proaktif ve hibrit rotalama şeklindedir.

Proaktif (veya tablo odaklı) yönlendirme protokolleri, hedefe (sink) giden yolları ihtiyaç duyulmadan önce oluşturur. Bu yaklaşımın temel avantajı, rotaların ihtiyaç duyulduğunda her zaman kullanılabilir olması ve talep üzerine yönlendirme protokollerinde olduğu gibi rotaları aramak için gecikme olmamasıdır (Dargie & Poellabauer, 2010). Farklı düğümler arasında periyodik olarak yönlendirme bilgilerinin değiştirilmesi, her düğümün bir hedefe ulaşmak için kullanılabilecek kendi yönlendirme tablosunu oluşturmasını sağlar. Bu süreç, düğümlerin kablosuz ağdaki topolojik değişikliklere yanıt vererek tutarlı bir ağ görünümünü sürdürmesini mümkün kılar. Sonuç olarak, bir düğümden hedefe giden yol veya bir paketin iletilmesi gerektiğinde, rota önceden bilinir ve ek bir gecikme yaşanmaz. Ancak, yönlendirme bilgilerini güncel tutmak, KAA’larda sınırlı olan bant genişliği ve enerji tüketimi açısından maliyetlidir ve bilgilerin her zaman güncel olmayabileceği de unutulmamalıdır (Fahmy, 2023).

Reaktif yönlendirme protokolleri, proaktif protokollerin aksine, yalnızca ihtiyaç duyulduğunda rotaları keşfeder ve sürdürür. Bir kaynaktan bir hedefe bir rota gerektiğinde, bir tür küresel arama prosedürü başlatılır. Bu görev, proaktif protokollerde olduğu gibi ağ üzerinden sürekli güncellemelerin gönderilmesini talep etmez, ancak bu süreç gecikmelere neden olur, çünkü talep edilen rotalar mevcut değildir ve bulunması gerekir (Fahmy, 2023). Bulunan rota, ya bozulana ya da kaynak düğüm tarafından artık kullanılmayana kadar aktif olarak sürdürülür (Dargie & Poellabauer, 2010). Reaktif yönlendirme protokollerinin tipik örnekleri, ad hoc talep üzerine vektör yönlendirmesi AODV (2003) ve dinamik kaynak yönlendirmesidir DSR (1996). Reaktif yönlendirme protokolü, ad-hoc ağlarda rotaların keşfi

ve bakımı için rota keşfi ve rota bakımı olmak üzere iki temel mekanizmadan oluşur. Rota keşfi ve rota bakımı her biri tamamen talep üzerine çalışır (Li, 2008).

Bazı protokoller ise hem reaktif hem de proaktif protokollerin özelliklerini sergiler ve hibrit yönlendirme protokolleri olarak kategorize edilebilir. Ancak bu kategoriler arasındaki sınırların çok da keskin olmadığı ifade edilebilir (Karl & Willig, 2007).

1.5.3. Protokol İşlemi

Müzakere tabanlı yönlendirme protokolleri, düğümlerin veri iletiminden önce birbirleriyle iletişim kurup anlaşmaya vardığı durumlarda veri gönderimini gerçekleştiren protokollerdir. Böylelikle gereksiz. veri iletiminin önüne geçilerek enerji tasarrufu sağlanır. En bilinen örneklerden biri SPIN (2002) protokolüdür. SPIN; reklam (ADV), talep (REQ) ve veri (DATA) olmak üzere üç aşamalı bir yaklaşımdır. Bir düğüm başka düğüm ya da düğümlere veri göndermeden önce veriye ait tanımı içeren bir ADV mesajını gönderir. Eğer reklam mesajını alan düğüm ilgili veriye ihtiyaç duyuyorsa gönderici düğüme REQ mesajını ile cevap verir. Son olarak REQ mesajını alan gönderici düğüm veriyi alıcıya gönderir.

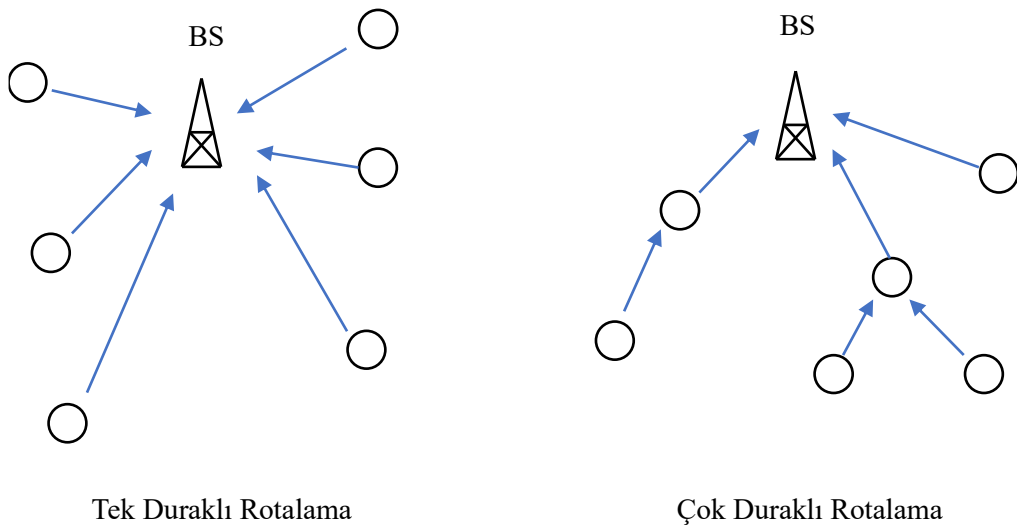
Çok yollu yönlendirme protokolleri, belirli bir gönderici ve alıcı arasında birkaç yol oluşturur. Şöyle ki, kaynak ve hedef düğüm dışında ortak bağlantıları veya düğümleri olmayan k tane yol bulunur (Karl & Willig, 2007). Bir protokolün hata toleransı (dayanıklılığı), birincil yol arızalandığında bir kaynak ile bir hedef arasında alternatif bir yolun bulunma olasılığı ile ölçülür. Bu alternatif yollar, periyodik mesajlar gönderilerek canlı tutulur. Dolayısıyla, alternatif yolları sürdürmenin artan enerji tüketimi ve trafik yükü pahasına ağ güvenilirliği artırılabilir. (Al-Karaki & Kamal, 2004). Tek yollu (unicast) yönlendirme protokollerine kıyasla daha düşük yönlendirme yükü, daha düşük uçtan uca gecikme ve daha az tıkanıklık gösterirler (Fahmy, 2023).

Hizmet kalitesi (QoS) tabanlı yönlendirme protokollerinde, KAA enerji tüketimi ile veri kalitesi arasında denge kurmak zorundadır. Özellikle ağ, BS'ye veri iletirken belirli QoS ölçütlerini (gecikme, enerji, bant genişliği vb.) karşılamak zorundadır (Al-Karaki & Kamal, 2004). Rotalama protokollerinin çoğu yalnızca ağdaki enerji tüketimine odaklanır. Ancak rotalama algoritmalarında enerji tüketimi, KAA'lardaki en önemli performans ölçütlerinden biri olsa da, tek ölçüt değildir. Özellikle, yeni uygulamaların geliştirilmesi, protokol tasarımında verim, gecikme gibi diğer performans ölçütlerinin de dikkate alınmasını gerektirir (Akyildiz & Vuran, 2010).

KAA’larda önerilen veri işleme tekniklerinin iki örneği evre uyumlu ve evre uyumsuz veri işleme yönlendirmedir (Sohrabi, Gao, & Pottie, 2000). Evre uyumlu işlemede, sensör düğümleri zaman damgalama ve tekrarlanan verilerin bastırılması gibi minimum görevleri yerine getirir ve ardından veriyi toplayıcılara iletir, bu da onu enerji açısından verimli bir seçenek haline getirir. Öte yandan, evre uyumsuz işlemede, sensör düğümleri veriyi yerel olarak işler ve daha sonra daha fazla işlem için diğer düğümlere gönderir. Bu işlem, hedef tespiti, üyelik bildirimi ve merkezi düğüm seçimi olmak üzere üç aşamadan oluşur. Enerji açısından verimli yönlendirme yapmak ön plandaysa, evre uyumlu işleme seçilir. Evre uyumsuz işlevler ise düşük veri trafiği yükünün gerektiği uygulamalarda tercih edilebilir. (Fahmy, 2023; Al-Karaki & Kamal, 2004; Jolly & Latifi, 2006).

Yukarıda ifade edilen tasnifin dışında rotalama protokolleri tek duraklı (single-hop) ve çok duraklı (multi-hop) olmak üzere iki şekilde incelenebilir. Tek duraklı rotalamada düğümler verilerini sadece bir durağa iletebilir. Örneğin hiyerarşik bir ağ söz konusu ise normal düğümler sadece küme başkanlarına veri gönderebilir. Küme başkanları da sadece BS’ye veri iletir. Aynı senaryonun çok duraklı versiyonunda küme başkanları başka küme başkanlarına veri gönderebilmektedir.

Özellikle, düğüm BS’den uzak olduğunda, veriyi doğrudan BS’ye göndermek için gereken enerji, daha yakındaki bir düğüm üzerinden gönderilmesine göre daha yüksek olduğundan, bazı durumlarda çok duraklı rotalama tercih edilmektedir. Aşağıda Şekil 9’da tek duraklı rotalama ile çok duraklı rotalamaya ait bir örnek verilmiştir.



Şekil 9. Tek duraklı rotalama (solda) ve çok duraklı rotalama (sağda)

1.6. Enerji Tüketim Modeli

Farklı algoritma ve protokollerin enerjisini ve kalitesini tahmin etmek için sensör düğümünün tüm yönlerine yönelik doğru modellere sahip olmak önemlidir (Wang, Heinzelman, Sinha, & Chandrakasan, 2001). KAA'larda düğümlerin veri iletimi ve alımı sırasında harcadıkları enerjiyi tahmin etmek amacıyla kullanılan çeşitli enerji tüketim modelleri mevcuttur (Roy & Chandra, 2020). Literatürde en yaygın kullanılan enerji tüketim modellerinden biri, Heinzelman ve diğerlerinin önerdiği ve LEACH protokolünde de kullanılan birinci dereceden radyo modelidir (Heinzelman, Chandrakasan, & Balakrishnan, 2000). Bu model, yol kaybı üstelinin 2 olarak alındığı Serbest Uzak Modeli (Free Space Model) ve yol kaybı üstelinin 4 olarak alındığı Çok Yollu Sönümlenme Modeli (Multi-Path Fading Model) şekilde incelenebilir. LEACH ardıllarına bakıldığında aynı şekilde birinci dereceden radyo modelinin kullanıldığı görülür. Dolayısıyla bu tez çalışmasında önerilen yaklaşımlarda adı geçen model esas alınmıştır. Aşağıda birinci dereceden radyo modeline dair iki yaklaşım ele alınarak incelenmiştir.

1.6.1. Serbest Uzak Modeli

Kablosuz Sensör Ağları için en yaygın kullanılan modellerden biri, serbest uzak modelidir. Modelin basitliği onu popüler hale getirir. Bu model, ağ ömrüne ve enerji verimliliğine odaklanan yönlendirme protokolü simülasyonlarının enerji dağılımını belirlemek için kullanılır. Bununla birlikte yüzey yansıtıcılığı, anten desenleri ile yükseklikleri gibi pek çok önemli parametreyi hesaba katmaz (Kurt & Tavli, 2017). Serbest uzak modeli, özellikle doğrudan görüş hattı (Line of Sight, LOS) bağlantılarının olduğu açık alanlarda ve düşük engelleme durumlarında kullanışlıdır. Bu modelde verici bölümü elektroniği çalıştırmak için ve amplifikatör tarafından gerçekleştirilen yükseltme işlemi sırasında enerji harcar. Alıcı bölümü de alıcının radyo elektroniğini çalıştırmak için enerji harcar. Ayrıca model gönderilen paket uzunluğunu enerji hesabına katarken, sensörlerin harcayacağı enerjiyi katmaz.

Model, iki ana bileşenden oluşur: iletim enerjisi ve alım enerjisi. Serbest Uzak Modeli, özellikle kısa mesafeli iletişimlerde enerji tüketimini tahmin etmek için idealdir. Bu model, düşük güç tüketimi gerektiren uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Örneğin, çevresel izleme sistemlerinde sensör düğümleri arasındaki kısa mesafeli iletişim için uygundur.

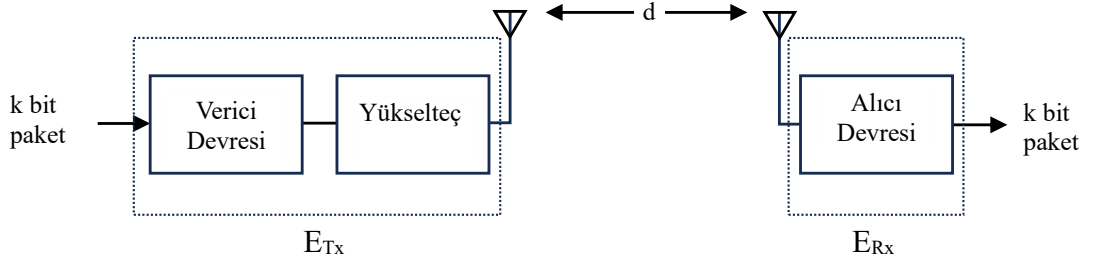
Şekil 10’da birinci dereceden radyo modeli gösterilmektedir. Bu modelde, baz istasyonunun sabit olduğu ve enerji ihtiyacının olmadığı düşünülmüştür. Bütün algılayıcıların da birbirinin aynı ve enerji kapasitelerinin de kısıtlı olduğu varsayılmıştır.

Buna göre alıcı ve verici devresinin çalışması esnasındaki elektronik devrenin bit başına enerji tüketimi, $E_{elec} = 50 \text{ nJ/bit}$ kabul edilmiştir. Tablo 2’de bit başına alıcı ve verici devresinin elektronik devrelerinde harcanan güç verilmiştir.

Tablo 2. Radyo karakteristikleri

İşlem	Enerji Tüketimi
Verici Devresi ($E_{Rx-elec}$)	50 nJ/bit
Alıcı Devresi ($E_{Rx-elec}$)	
($E_{Tx-elec} = E_{elec}$)	100 pJ/bit/m ²
Verici Yükselteci (ϵ_{amp})	

Aynı şekilde verici yükseltecinin 1 metre uzaklığa 1 bit veri gönderirken harcadığı enerji de 100 pJ/bit/m² şeklinde verilmiştir.



Şekil 10. Birinci dereceden radyo modeli

Bununla beraber, kanal koşullarının neden olduğu enerji kaybını da d^2 ile ters orantılı olduğu düşünülürse, k bit göndermek için verici tarafta harcanan enerji Denklem (5) ve Denklem (6)’daki gibi bulunur.

$$E_{Tx}(k, d) = E_{Tx-elec}(k) + E_{Tx-amp}(k, d) \quad (5)$$

$$E_{Tx}(k, d) = E_{elec}k + \epsilon_{amp}kd^2 \quad (6)$$

Ve alıcı taraftaki güç tüketimi de Denklem (7) ve (8) 'deki gibi ifade edilir.

$$E_{Rx}(k) = E_{Rx-elec}(k) \quad (7)$$

$$E_{Rx}(k) = E_{elec}k \quad (8)$$

Burada, veri alınırken harcanan enerjinin paket boyu aynı olduğu müddetçe sabit olduğu ve uzaklığa bağlı olmadığı görülmektedir. Yapılan benzetimlerde de, kalan toplam enerji hesabı yapılırken, iletişim sırasında vericinin ve alıcının enerji tüketimi, gerçek zamanlı olarak ilgili düğümlerin mevcut enerji düzeylerinden eksiltiştir. Ayrıca, bu çalışmada LEACH'ten farklı olarak, KB olarak seçilen düğümlerin reklam mesajları için harcadıkları enerji de düğümlerin enerjisinde düşülmüştür.

1.6.2. Çok Yollu Sönümlenme Modeli

Birinci dereceden radyo modelinde enerjinin belli bir eşikten sonra uzaklığın dördüncü kuvvetiyle azaldığı durumu ifade eder. Eşiğe kadar serbest uzay modeli geçerli olmuş olur.

Çok yollu zayıflama modelinde, bir vericinin k bitlik veriyi d mesafesine iletmek için harcadığı enerji şu şekilde hesaplanır (Heinzelman, Chandrakasan, & Balakrishnan, 2002):

$$E_{Tx}(k, d) = E_{elec}k + \epsilon_{fs}kd^2 \quad (d < d_0) \quad (9)$$

$$E_{Tx}(k, d) = E_{elec}k + \epsilon_{mp}kd^4 \quad (d \geq d_0) \quad (10)$$

Burada, d_0 , serbest uzay ve çok yollu zayıflama modelleri arasındaki tercihi belirleyen eşik mesafesidir. d_0 genellikle aşağıdaki denkleme göre belirlenir (Abdulzahra & Al-Qurabat, 2024):

$$d_0 = \sqrt{\frac{\epsilon_{fs}}{\epsilon_{mp}}} \quad (11)$$

Bu formül, sinyalin hangi mesafede serbest uzay yayılımından çok yollu yayılıma geçiş yaptığını belirler. Eşik mesafesi, ağın yerleştirildiği çevresel koşullara ve kullanılan donanım özelliklerine bağlı olarak değişebilir. Denklemde yer alan ϵ_{fs} serbest uzay

zayıflama modelinin enerji katsayısını, ϵ_{mp} ise çok yollu zayıflama modelinin enerji katsayısını ifade eder. Tipik değerleri Heinzelman vd. (2002) tarafından tanıtılan çalışmada $\epsilon_{fs} = 10 \text{ pJ/bit/m}^2$ ve $\epsilon_{mp} = 0.0013 \text{ pJ/bit/m}^4$ olarak alınmıştır. Dolayısıyla bu değerler Denklem (11)'de yerine konulduğunda $d_0 = 87.70$ metre olarak hesaplanır. Yani BS ya da düğüm bu mesafeden uzaktaysa çok yollu zayıflama modeli kullanılır.

Elektronik devrenin harcadığı bit başına harcadığı enerji, E_{elec} , dijital kodlama, modülasyon, filtreleme gibi faktörlere bağlıyken, amplifikatör enerjisi, $\epsilon_{fs}d^2$ veya $\epsilon_{mp}d^4$, alıcıya olan mesafeye ve kabul edilebilir bit hata oranına bağlıdır (Heinzelman, Chandrakasan, & Balakrishnan, 2002).

Bu modelde, bir alıcının k bitlik veriyi almak için harcadığı enerji, serbest uzay modelinde olduğu gibi hesaplanır:

$$E_{Rx}(k) = E_{elec}k \quad (12)$$

Sonuç olarak bir düğümün enerji tüketimi veri iletimi ve veri alımı sırasında harcadığı enerjilerin toplamı olacaktır.

1.7. Analitik Hiyerarşi Prosesi

Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) çok kriterli senaryolar için tasarlanmış sistematik bir karar verme yöntemidir (Saaty, 1982). AHP, belirlenen kriterler ve bu kriterlere atanan önem dereceleri ile alternatifler arasından en iyisini analitik olarak seçmeyi hedefler (Saaty, 2008). AHP'de ilk olarak problemin çözümü için hiyerarşik bir yapı meydana getirilmektedir (An, Kim, & Kang, 2007). Hiyerarşik yapı oluşturulduktan sonra kriterlerin göreceli önem derecelerini gösteren ikili karşılaştırma matrisi (üstünlükler belirlenir) hesaplanmaktadır (Cao, Leung, & Law, 2008; Basak, 2002). Göreceli önemleri hesaplamak için Saaty'nin özvektör yöntemi kullanılmaktadır (García-Cascales & Lamata, 2009). Daha sonra matriste yer alan değerlerin tutarlı olup olmadığı, tutarlılık oranının tespitiyle kontrol edilmektedir (Chou, Hsu, & Chen, 2008). Tutarlılık oranı kabul edilebilir düzeyde ise alternatiflerin öncelik sıralamasına geçilmektedir. Böylece en yüksek değeri elde eden alternatif seçilmektedir (Yılmaz, 2010).

AHP yönteminde kriterlere göre önem dereceleri tanımlanır. Tablo 3'te AHP yöntemine ilişkin bu çalışmada da kullanılan değerlendirme ölçeği gösterilmektedir.

Tablo 3. AHP değerlendirme ölçeği

Önem	Tanım	Açıklama
1	Eşit derecede önemli	İki faktör aynı derecede önem taşır
3	Biraz daha fazla önemli	Biri diğerine göre biraz daha fazla önem taşır
5	Oldukça önemli	Biri diğerine göre oldukça önem taşır
7	Çok daha önemli	Biri diğerine çok daha fazla önem taşır
9	Kesinlikle daha önemli	Biri diğerine göre kesinlikle daha fazla önem taşır
2,4,6,8	Ara Değerler	Tercih değerleri birbirine yakın olduğunda kullanılır.

Literatürde alternatiflerin ve kriterlerin üstünlük derecelerinin elde edilebileceği çeşitli yöntemler bulunmaktadır (Ishizaka & Lusti, 2006). Bu tez çalışmasında bunlardan biri olan normalize edilmiş değerlerin ortalaması yaklaşımı kullanılmaktadır.

Aşağıda gösterilen karşılaştırma matrisi (A), kriterler veya alternatifler arasındaki ikili karşılaştırmalar sonucunda elde edilir. Eğer n adet alternatif varsa, $n \times n$ boyutunda bir karşılaştırma matrisi oluşturulur. Bu matrisin her bir elemanı a_{ij} , kriter i ile kriter j arasındaki önem derecesini temsil eder.

Geçişlilik (13)ve karşılıklılık (14) kurallarına uyulursa, çiftler halinde karşılaştırma matrisi tutarlı olarak adlandırılır (Ishizaka & Lusti, 2006).

$$a_{ij} = a_{ik} \cdot a_{kj} \quad (13)$$

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}} \quad (14)$$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ \frac{1}{a_{12}} & 1 & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ \frac{1}{a_{13}} & \frac{1}{a_{23}} & 1 & \dots & a_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{a_{1n}} & \frac{1}{a_{2n}} & \frac{1}{a_{3n}} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (15)$$

Yukarıdaki A matrisinde öncelikle her sütundaki elemanların toplamı bulunur. Daha sonra her a_{ij} kendi sütun toplamına bölünmek suretiyle normalize edilir. En son olarak da her satırdaki normalleştirilmiş değerlerin ortalaması alınır. Denklem (16)' da verilen bu işlem ilgili kriterin alternatif bazında ağırlığını vermiş olur.

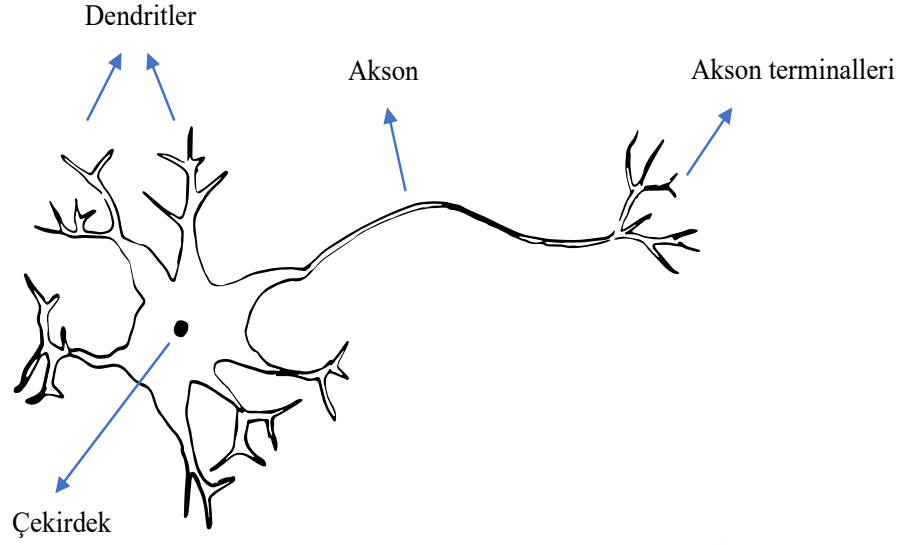
$$ca_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \right) \quad (16)$$

Kriterlerin alternatifler bazında aldığı önem puanı hesaplandıktan sonra kriterler arası baskınlık için de aynı işlem yapılır ve ilgili alternatif için sonuç ağırlıklandırılmış ortalama ile üretilir. Bu durumun sunulan yöntemdeki uygulaması Denklem (37)'de verilmiştir.

1.8. Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları, adından da anlaşılacağı gibi, biyolojik (insan veya hayvan) merkezi sinir sisteminin sinir hücrelerini (nöron) kaba bir şekilde simüle etmeye çalışan hesaplamalı ağlardır (Graupe, 2013). Bu ağlar, biyolojik nöronların işlevlerini taklit eden basit hesaplama elemanları olan "nöronlar" ile çalışır ve bu nöronlar birbirleriyle çeşitli bağlantılar aracılığıyla iletişim kurar (Kumar, 2012; Abraham, 2006). Basit bir nöron dendritler, akson, akson terminallerinden oluşur. Dendritler diğer nöronların akson terminallerinden gelen sinyalleri alır ve akson boyunca iletir. Daha sonra ilgili nöronun akson terminalleri vasıtasıyla bu sinyaller başka bir nöronun dendritine iletilmiş olur. Şekil 11'de biyolojik sinir hücresinin basit bir çizimi verilmiştir.

YSA'ların biyolojik sinir hücresini taklit yeteneği, onları geleneksel dijital bilgisayarlardan ayıran önemli bir özelliktir, zira YSA'lar karmaşık ve matematiksel olarak iyi tanımlanmamış problemleri çözmede basit ve kendiliğinden organize olabilen algoritmalar kullanır. Bu basitlik, aynı zamanda YSA'ların biyolojik sistemlerin verimliliğine benzer bir performans sergilemesine olanak tanır (Graupe, 2013). YSA'ların biyolojik sinir sistemleri ile olan benzerliği, onların sadece taklit yetenekleriyle sınırlı kalmadığını, aynı zamanda bu sistemlerin verimliliğini ve dayanıklılığını da modellediğini gösterir.

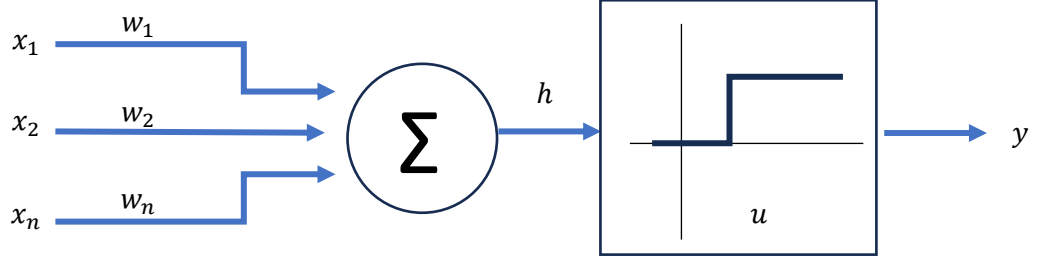


Şekil 11. Biyolojik sinir hücresinin temsili çizimi

YSA'lar, çok sayıda işlemciyi paralel olarak çalıştırarak, hata toleransı ve işlem hızı gibi avantajlar sunar (Kulkarni, Kulkarni, & Kenchannavar, 2017). Graupe (2013), ayrıca, biyolojik sinir ağlarının yüksek paralellik derecesine sahip olduğunu ve bu sayede birkaç nöronun kaybının genel beyin fonksiyonlarını etkilemediğini vurgular. Bu özellik, YSA'ların dayanıklılık ve esneklik bakımından biyolojik sistemlerle benzerlik göstermesine neden olur.

YSA'ların öğrenme süreci, sinaptik ağırlıkların ayarlanması ve hataların düzeltilmesine dayanır (Nielsen, 2001). Bu süreçte, ağın performansı zamanla iyileştirilir ve ağırlıklar, hedef çıktıya ulaşılan kadar sürekli olarak ayarlanır. Bu öğrenme süreci, YSA'ların çeşitli problem türlerine adapte olmasını sağlar ve onların esnekliğini artırır (Kumar & Thakur, 2012). Genel olarak, bir ağı eğitmek için birçok girdi/hedef çiftine ihtiyaç vardır (Beale, Hagan, & Demuth, 2010). Yapay Sinir Ağlarının başarılı olmasının ana nedenlerinden biri, büyük veri setleri üzerinde eğitilerek yeni ve farklı verilere de doğru tahminlerde bulunabilme yeteneğidir.

Sinir ağılarına yönelik ilk ilgi, McCulloch ve Pitts (1943) tarafından bağlantıcı modeller olarak da bilinen basitleştirilmiş nöronların tanıtılmasından sonra ortaya çıkmıştır (Kumar & Thakur, 2012). Bu modelde nöron, n adet giriş sinyalinin, x_j ($j = 1, 2, \dots, n$) ağırlıklı toplamını hesaplar. Bu toplam belirli bir u eşik değerinin üzerinde olduğunda 1, aksi halde 0 çıktısı üretir.



Şekil 12. McCulloch ve Pitts (1943) nöron modeli

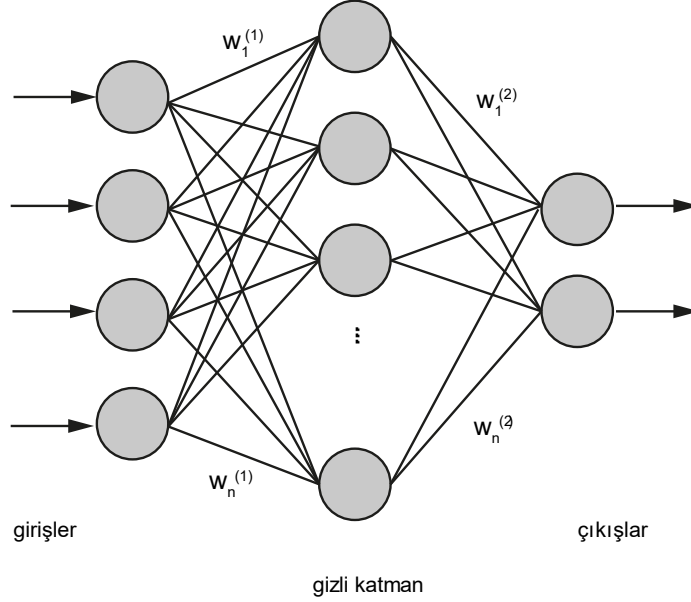
$$y = \theta \left(\sum_{j=1}^n w_j x_j - u \right) \quad (17)$$

Burada $\theta(\cdot)$ 0'daki birim basamak fonksiyonudur ve w_j j 'inci girişle ilişkili sinaps ağırlığıdır. Notasyonu basitleştirmek ve matematiksel modeli daha kullanışlı hale getirmek için, bu eşik değeri u , özel bir tür ağırlık olarak ele alınabilir. Bu durumda, u değeri, $w_0 = -u$ olarak temsil edilir ve sabit bir giriş $x_0 = 1$ ile ilişkilendirilir. Bu model, zamanla eşik değer fonksiyonunun yanı sıra sigmoid, gauss ve hiperbolik tanjant gibi farklı aktivasyon fonksiyonları kullanılarak daha da geliştirilmiştir. YSA'lar transfer fonksiyonu olarak en sık sigmoid fonksiyonu kullanılmaktadır (Jain, Mao, & Mohiuddin, 1996). Standart sigmoid fonksiyonu Denklem (25)'te verilmiş olup β eğim değişkenidir.

$$\theta(x) = \frac{1}{1 + e^{-\beta x}} \quad (18)$$

YSA'ların yapısı, genellikle üç katmandan oluşur: giriş katmanı, gizli katmanlar ve çıkış katmanı. Giriş katmanı, dış dünyadan gelen ham veriyi alır, gizli katmanlar bu veriyi işler ve son olarak çıkış katmanı nihai çıktıyı üretir (Kumar & Thakur, 2012; Kulkarni,

Kulkarni, & Kenchannavar, 2017). Şekil 13'te dört adet giriş ve 2 adet çıkış üreten yapay sinir ağına dair basit bir örnek gösterilmiştir.



Şekil 13. Çok katmanlı yapay sinir ağlarına dair bir örnek

lır.

İleri beslemeli ağlar, geçmiş durumlarından bağımsız olarak çıktılar üretirken, geri beslemeli ağlar dinamik sistemlerdir ve her yeni girdide farklı bir durum oluştururlar (Jain, Mao, & Mohiuddin, 1996).

Öğrenme, sinir ağının kendisini bir uyarana adapte ettiği ve sonunda istenen yanıt ürettiği süreçtir. Öğrenme süreci boyunca, ağ, uygulanan girdilere karşılık olarak sinaptik ağırlıklarını ayarlar. Bu süreç, ağın ürettiği gerçek çıktı yanıtının istenen yanıtla tam olarak örtüşmesini sağlar ve böylece ağ, öğrenme aşamasını başarıyla tamamlamış olur (Mehta, Mehta, Manjunath, & Ardil, 2008). Sinir ağlarındaki öğrenme yöntemleri üç kategoriye ayrılabilir. Bunlar öğretmenli öğrenme, öğretmensiz öğrenme ve destekleyici öğrenmedir.

Öğretmenli (Supervised) öğrenme, eğitim verilerinden yapay sinir ağının parametrelerini ayarlayan bir makine öğrenme tekniğidir. Eğitim veri seti, her biri bir giriş (input) ve buna karşılık gelen doğru bir çıkış (output) etiketine sahiptir. Öğretmenli yapay sinir ağının görevi, çıktı değerini gördükten sonra geçerli herhangi bir girdi değeri için parametrelerinin değerini ayarlamaktır. (Suzuki, 2011).

Çok Katmanlı Algılayıcı (ÇKA) modelinde, ağın her bir nöronu türevlenebilir, doğrusal olmayan bir aktivasyon fonksiyonu ile donatılmıştır; bu fonksiyon, ağın karmaşık verileri işleyebilme ve doğrusal olmayan desenleri tanıma yeteneğini sağlar. ÇKA, giriş ve çıkış katmanları arasında gizlenmiş bir veya daha fazla katman içerir; bu gizli katmanlar, verilerin işlenmesi ve öğrenilmesi süreçlerinde kritik bir rol oynar. Ayrıca, ağın yüksek derecede bağlantılı bir yapıya sahip olması, yani nöronların geniş bir sinaptik ağırlıklar ağı ile birbirine bağlanması, ağın karmaşıklığını ve çözüm kapasitesini artırır (Haykin, 2009).

Çok katmanlı algılayıcının girişi aşağıda verilen $\mathbf{x}$ vektöründen oluşsun:

$$\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n] \quad (19)$$

Her gizli katmandaki nöron, bir önceki katmandan gelen girişleri alır ve bu girdilerle bağlantılı ağırlıklar w ve bias b kullanılarak bir ağırlıklı toplam hesaplar. Gizli katmandaki j nöronunun çıktısı h_j , aktivasyon fonksiyonu $\theta(\cdot)$ uygulanarak aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$h_j = \theta \left(\sum_{i=1}^n w_{ji} x_i + b_j \right) \quad (20)$$

Çıkış katmanındaki nöronlar, son gizli katmandan gelen verileri alır ve bu verilerle yine ağırlıklı bir toplam hesaplar. k sayıda çıkış nöronu varsa, y_k çıkışı şu şekilde ifade edilir:

$$y_k = \theta \left(\sum_{j=1}^m w_{kj} h_j + b_k \right) \quad (21)$$

Bazı hata değerleri negatif olacağından toplamın sıfır olmasını önlemek amacı ile ağırlıkların kareleri hesaplanarak sonucun kare kökü alınır. ÇKA ağının eğitilmesindeki amaç bu hatayı en aza indirmektir (Öztemel, 2003). Dolayısıyla ÇKA'da, beklenen çıktı d_k ile gerçek çıktı y_k arasındaki hata olmak üzere, çıktı katmanında oluşan toplam hata Denklem (22)'deki gibi bulunur.

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^K (y_k - d_k)^2 \quad (22)$$

Bu hata, geri yayılım algoritması kullanılarak, ağırlıklarının ve biaslarının güncellenmesi için kullanılır. Geri yayılım, hata fonksiyonunun ağırlık parametrelerine göre türevini alarak, dereceli azalma (gradient descent) yöntemiyle hatayı minimize eder.

Ağırlıkların güncellenmesi şu şekilde yapılır:

$$\Delta w_{ji} = -\eta \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial w_{ji}} \quad (23)$$

w_{ji} ağırlığına uygulanan Δw_{ji} düzeltmesi Burada, η geri yayılım algoritmasının öğrenme oranıdır. $\frac{\partial \mathcal{E}}{\partial w_{ji}}$ terimi ise hata fonksiyonunun, w_{ji} ağırlığına göre türevidir. Eksi işareti ise ağırlık uzayında dereceli azalmayı temsil eder (Haykin, 2009).

Öğretmensiz öğrenme, eğitim veri setindeki her girdi ile ilişkili doğru yanıt etiketi gerektirmez. Verilerdeki temel yapıyı veya verilerdeki desenler arasındaki korelasyonları araştırır ve desenleri bu korelasyonlardan kategorilere ayırır.

Destekleyici (Reinforcement) öğrenme ağa yalnızca ağ çıktılarının doğruluğu hakkında bir eleştiri sağlandığı, doğru yanıtların kendisinin sağlanmadığı öğretmenli öğrenmenin bir çeşididir (Jain, Mao, & Mohiuddin, 1996).

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu bölümde literatürdeki yöntemlerin dışında, iki farklı enerji etkin yaklaşım önerilmiş, LEACH ile kıyaslanarak tartışılmıştır. Dağıtık LEACH-AHP Rotalama Yöntemi ile YSA Destekli Küme Başkanı Seçim Yöntemi adı verilen bu çalışmalar detaylarıyla ele alınmıştır. Ayrıca her iki yaklaşım için aşağıdaki maddeler geçerlidir:

- Önerilen yaklaşımlar dağıtık yapıdadır ve KB seçimi düğümlerde yapılır.
- Bir tur yahut bir döngü, ağdaki bütün düğümlerin paketlerini baz istasyonuna iletmesi anlamına gelir. Bir sonraki turda aynı süreç tekrarlanır.
- Ağın ölmesi, son düğümün ölmesi ile ilişkilidir ve ağ ömrü tur sayısı ile verilir.
- Her iki yaklaşımda enerji tüketim modeli olarak serbest uzay modeli kullanılmıştır.

2.1. Dağıtık LEACH-AHP Rotalama Yöntemi

AHP yöntemi, yönlendirme, topoloji kontrolü ve enerji verimliliği de dahil olmak üzere ağ performansının çeşitli yönlerini geliştirmek için KAA'lar için benimsenmiştir. Chang vd. (2017) kablosuz ağlarda rotalama kararlarını önemli ölçüde iyileştiren, AHP'ye dayalı dağıtılmış bir ortak optimizasyon rotalama algoritması önermiştir. Ancak yazarlar algoritmanın karmaşıklığı ve ölçeklenebilirliği zorlu konular olarak tanımlamıştır. Huang vd. (2020) makine titreşimi izlemede dengeli topoloji kontrolü için bulanık AHP tabanlı bir yaklaşım kullanarak daha iyi ağ kararlılığı ve enerji dağıtımını elde etmiştir. Bu gelişmelere rağmen bulanık AHP yöntemi, tüm KAA uygulamaları için mümkün olmayabilecek kapsamlı hesaplama kaynakları gerektirir.

Srivastava ve Mishra (2023), çalışmalarında kalan enerji, komşu düğüm sayısı ve BS'ye olan mesafe gibi üç ayrı faktörün ağırlıklarını hesaplamak için AHP kullanan bir metodoloji önermektedir. Ardından, bu ağırlıklar, sensör düğümlerini sıralamak için modifiye edilmiş PROMETHEE-II yöntemine dahil edilir ve en yüksek sıraya sahip düğüm küme başkanı olarak atanır. Dikkate değer bir şekilde, önerilen yaklaşım, diğer düğümlere göre altı kat daha yüksek enerji seviyelerine sahip olan ve küme başkanı olarak da hizmet verebilecek olan ağ geçitlerini tanıtmaktadır.

Ek olarak, Nigam ve Dabas (2021) tarafından önerildiği gibi ESO-LEACH algoritması, optimum küme başlarını belirlemek için parçacık sürü optimizasyonu (HPSO)

ve K-ortalamları birleştiren bir hibrit yaklaşım kullanır. Ancak, bu algoritmanın daha yüksek enerji kapasitelerine sahip gelişmiş düğümleri gerektirmesi dikkat çekicidir.

Sharmin vd. (2023) tarafından sunulan işbirlikçi çerçevede, HPSO ve geliştirilmiş LEACH (HPSO-I-LEACH) sinerjik olarak kullanılır. HPSO, KB seçimi için kullanılırken, I-LEACH sonraki küme oluşumu için kullanılır.

Mehta ve Saxena (2022) tarafından sunulan FMCB-ER algoritması, bulanık çok kriterli kümeleme ve biyolojik esinlenmeli enerji verimli rotalamayı birleştirir. Bu algoritma, küme başkanlarını belirlemek için Bulanık-AHP ve ideal çözüme benzerlik yoluyla sıralama tekniği (TOPSIS) yöntemlerini entegre eder. Ayrıca, en verimli yolları küme başkanlarından BS'ye kadar belirlemek için imparator penguen optimizasyonu (EPO) algoritması da dahil edilmiştir.

Prashanth ve Manjunatha (2023) tarafından önerilen çalışmada, beş farklı enerji seviyesine sahip düğüm türlerinden oluşan bir ağı içeren küme tabanlı enerji verimli yönlendirme protokolü (CEER) tanıtılmaktadır. Bulanık-AHP yöntemi, eşik değerlerini (α , β ve σ parametreleriyle temsil edilir) belirlemek için kullanılır. Bulanık-AHP yöntemi, eşik değerlerini belirlemek için kullanılır (α , β ve σ parametreleriyle temsil edilir). Önerilen protokol, her biri belirli bir düğüm türüne yönelik beş farklı eşik belirleme denklemi sunar ve bu denklemler, kalan enerji, ana istasyona olan mesafe ve güvenilirlik gibi faktörleri göz önünde bulundurur.

Bu çalışmada, temel amaç, bir düğüme ait komşu düğümlerin enerjileri ve BS'ye olan uzaklıklarıyla ilişkili 100 farklı senaryo oluşturarak bu senaryolara ait optimum eşikleri 10x10 bir matrisin içinde saklamaktır. Düğümlerin, komşu düğümlerinin enerji ve mesafe durumlarına ilişkin bilgiyle donatıldığı ve mevcut durumlarına uygun bir eşik değeri seçilmesi gerektiği varsayılmaktadır. Seçilen eşik değeri, bir düğümün KB rolünü üstlenme olasılığına karşılık gelir. Bu eşik değerlerini çevrimdışı bir ortamda belirlemek için AHP metodolojisi uygulanmıştır. Enerji ve mesafe kriterlerinin üstünlüğünü değerlendirmek amacıyla, 1 ile 9 arasındaki tüm olası değerler, adım büyüklüğü 1 olacak şekilde sistematik olarak test edilmiştir. Her bir üstünlük senaryosu için, aynı enerji ve mesafe yapılandırmalarıyla karakterize edilen birden fazla ağ ile sonuçlanan rastgele ağ topolojileri üretildi. Elde edilen çok sayıda eşik değerinden, kalan enerjiyi veya BS'ye ulaşan toplam paket sayısını optimize edenler belirlendi. Önerilen yöntem aşağıdaki önemli avantajları sunmaktadır (Gangal, Cinemre, & Hacıoglu, 2024):

- Önerilen yöntem dağıtık bir yapıya uymaktadır.

- Her turun sonunda işlemi tekrarlamak yerine, önceden belirlenmiş sayıda turdan sonra KB seçimi yapılması önerilir.
- Elde edilen çıktılar ışığında, sunulan yöntem optimum bir eşik değeri önermektedir.

2.1.1. Önerilen AHP'li Eşik Belirme Süreci

Bu çalışmada küme başkanı seçiminde, Analitik Hiyerarşi Prosesi algoritması ile olası tüm durumlar için eşik değerleri belirlenmiştir. Bu durumlar; düğümlerin kendi enerjileri, kapsama alanındaki komşularının enerjileri, düğümlerinin kendilerinin ve komşularının BS'ye olan uzaklıklarına bağlı olarak elde edilmiştir. AHP algoritması ilgili duruma yönelik T eşik değeri belirlemede kullanılmıştır. Olası tüm durumlara ilişkin eşik değerleri merkezi olarak hesaplanmış ve tüm düğümlere bildirilmiştir. Düğümler de içinde bulundukları duruma göre bu eşik değerlerini kullanarak KB olup olmayacaklarını belirlemişlerdir. Ancak elde edilen sonuçlar göstermiştir ki olası tüm durumlar için belirlenen eşik değerleri birbirine oldukça yakındır. Bu sebeple komşularının enerji ve uzaklık bilgisine ihtiyaç duyulmayan tek bir eşik değeri kullanan bir yöntem de önerilmiştir. Bu eşik değeri; AHP ile olası tüm durumlar için belirlenen eşik değerlerinin ortalamasıdır.

Öte yandan önerilen yöntemde LEACH'ten farklı olarak küme başkanı olan düğümler belli bir döngü sayısı kadar küme başkanı olmayı sürdürür. Önerilen yöntemde KB olma ve KB olmama arasından tercih yapılmaktadır. Uzaklık/Yakınlık derecesi ağ boyutlarına göre düzgün dağılımın ortalaması olarak alınır. Kriterler ise komşuların yüzde kaçının BS'ye belirlenen mesafeden daha yakın olduğu (U) ve yüzde kaçının daha az enerjili (E) olduğudur. Kriterler birbiri ile aşağıdaki gibi kıyaslanmaktadır.

Tablo 4. Uzaklık ve kalan enerji düzeyi kriterlerine göre karşılaştırma tablosu

Kriter	E	U
E	1	$C(k)$
U	$\frac{1}{C(k)}$	1

Yukarıdaki tabloda $C(k)$, E 'nin U 'ya olası üstünlük değerlerini içinde barındıran bir C dizisinin k 'ıncı elemanını göstermektedir. C dizisi aşağıda Denklem (24)'te gösterilmektedir.

Denklem (24)'ten görüldüğü gibi E 'nin her koşulda U 'da üstün olduğu varsayılmıştır ancak bu üstünlük derecesi değişkenlik göstermektedir.

$$C = [3 \quad 5 \quad 7] \quad (24)$$

KB olma (KB) ya da olmama ($\overline{KB}$) alternatifleri arasından E ve U kriterlerine göre aşağıdaki karşılaştırma tabloları yardımı ile tercih yapılmaktadır.

Tablo 5. Kalan enerji düzeyi kriterine göre ikili karşılaştırma matrisi

Alternatifler	KB	$\overline{KB}$
KB	1	$E(k)$
$\overline{KB}$	$\frac{1}{E(k)}$	1

Yukarıdaki tabloda $E(k)$; içinde enerji kriterine göre KB 'nin $\overline{KB}$ 'e olası üstünlük değerlerini içinde barındıran bir E dizisinin k 'ıncı elemanıdır.

$$E = \left[1 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 5 \quad 6 \quad 7 \quad 8 \quad 9 \quad \frac{1}{2} \quad \frac{1}{3} \quad \frac{1}{4} \quad \frac{1}{5} \quad \frac{1}{6} \quad \frac{1}{7} \quad \frac{1}{8} \quad \frac{1}{9} \right] \quad (25)$$

Benzer şekilde alternatifler komşu düğümlerin yüzde kaçının BS'ye daha yakın olduğuna göre aşağıdaki gibi birbiri ile kıyaslanır.

Tablo 6. BS'ye uzaklık kriterine göre ikili karşılaştırma matrisi

Alternatifler	KB	$\overline{KB}$
KB	1	$U(k)$
$\overline{KB}$	$\frac{1}{U(k)}$	1

Yukarıdaki tabloda $U(k)$; içinde uzaklık kriterine göre KB 'nin $\overline{KB}$ 'ye olası üstünlük değerlerini içinde barındıran bir U dizisinin k 'ıncı elemanıdır.

$$U = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & \frac{1}{2} & \frac{1}{3} & \frac{1}{4} & \frac{1}{5} & \frac{1}{6} & \frac{1}{7} & \frac{1}{8} & \frac{1}{9} \end{bmatrix} \quad (26)$$

AHP algoritmasının girdilerini oluşturan $E(k)$ ve $U(k)$ değerleri kalan enerji ve BS'ye olan uzaklıklarla ilgilidir. Dolayısıyla küme başkanı seçimi sırasında komşu düğümlerin enerjilerinin ve BS'ye uzaklıklarının bilinmesi gerekmektedir. Yani düğümler, belirli zaman aralıklarında enerji bilgilerini diğer düğümlerle paylaşmalıdır, uzaklık bilgilerinin her defasında bilinmesine gerek olmadığından, BS tarafından bir kere yayınlanması yeterli olacaktır. Yine de enerji bilgisinin diğer düğümlerle paylaşılması toplamda enerji tüketimini bir miktar artıracaktır. Benzetimlerde bu durum dikkate alınmış ve küme başı güncellemelerinde bütün düğümlerden enerji bilgisini gönderebilmeleri ve diğer düğümlerin de alabilmeleri için ilgili enerji düşümü yapılmıştır.

Olası enerji ve uzaklık durumlarını temsil eden n^2 adet durumun olduğu varsayılmaktadır. Göz önüne alınan n^2 adet duruma ilişkin AHP ile elde edilen eşik değerleri $n \times n$ 'lik D eşik değer matrisinde saklanmaktadır. Denklem (27)'de D matrisi gösterilmektedir. D matrisinde satırlar enerji, sütunlar ise uzaklıkla ilişkilidir.

Buna göre; $D(e, u)$ değeri düğümlerin $\%(e \times n)$ 'nin daha az enerjili olduğu ve $\%(u \times n)$ 'nin BS'ye daha yakın olduğu durumundaki eşik değeri anlamına gelmektedir. Dolayısıyla $D(1,9)$; $n = 10$ için düğümlerin %10'unun daha az enerjili olduğu ve %90'ının BS'ye daha yakın durumdaki T değerini ifade eder.

$$D = \begin{bmatrix} D(1,1) & \dots & D(1,n) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ D(n,1) & \dots & D(n,n) \end{bmatrix} \quad (27)$$

Önerilen yöntemde KB olan düğüm belli bir döngü sayısı kadar KB olmaya devam eder buna KB seçilme periyodu denilir. Olası KB seçilme periyodu değerlerinin tersi aşağıda gösterilen bir P dizisi içinde bulunmaktadır.

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \frac{1}{p_1} & \frac{1}{p_2} & \dots & \frac{1}{p_i} \end{bmatrix} \quad (28)$$

Denklem (28)'deki $\frac{1}{p_1}, \frac{1}{p_2}, \dots, \frac{1}{p_i}$ değerleri i adet olası KB seçilme periyodunu belirtmektedir. $\mathbf{D}$ 'deki herhangi bir $D(e, u)$ değeri için $\mathbf{P}$ 'de tanımlı her bir KB seçilme periyodu sırayla denenmiştir.

$\mathbf{D}$ matrisinin boyu $n \times n$ olduğundan, $\mathbf{D}$ matrisinin n^2 elemanından her birinin gerektirdiği enerji ve uzaklık özelliklerine sahip olan n^2 adet ağ, deneme sayısı ds için ayrı ayrı rastgele yerleşimli olarak oluşturulmuştur. Yani toplamda $n^2 \times ds$ adet birbirinden farklı düğüm koordinatlarına sahip ağ oluşturulmuş olmuştur.

Aşağıda bir $D(e, u)$ değerine karşılık oluşturulan bir ağdaki düğümlerin enerji değerlerinin elde edilmesi gösterilmektedir.

$$\mathbf{ez} = e_{max} \times rand\left(1, e \times n \times \frac{N}{100}\right) \quad (29)$$

Denklem (29)'da e_{max} ağdaki düğümlerin maximum enerjisini göstermektedir. Ayrıca $rand\left(1, e \times n \times \frac{N}{100}\right)$ fonksiyonu 1 satır $\left(e \times n \times \frac{N}{100}\right)$ sütundan oluşan yani toplam $\left(e \times n \times \frac{N}{100}\right)$ adet $(0,1]$ arasında düzgün dağılımlı sayı üretmektedir. Oluşturulan $\left(e \times n \times \frac{N}{100}\right)$ adet 0 ile e_{max} arasında değişen enerji değeri ağdaki N adet düğümden rastgele olarak seçilen $\left(e \times n \times \frac{N}{100}\right)$ adedine dağıtılmaktadır. Geri kalan $N - \left(e \times n \times \frac{N}{100}\right)$ adet düğümün ise e_{max} enerjiye sahip olduğu varsayılmıştır.

Düğümlerin istenen uzaklık özelliklerine göre koordinatları oluşturulurken düğümlerin dairesel bir kapsama alanına sahip olduğu varsayımı ile bir düğümün kapsama alanının çapı R olarak kabul edilmiştir.

$$\mathbf{uz} = \frac{R}{2} \times rand\left(1, u \times n \times \frac{N}{100}\right) \quad (30)$$

Denklem (30) ile $\left(u \times n \times \frac{N}{100}\right)$ adet değerleri 0 ile $\frac{R}{2}$ arasında düzgün dağılımlı olarak değişen uzaklık elde edilmiştir. Ağdaki sink'in konumu (xs, ys) olarak varsayılmıştır.

Aşağıda $\left(ys - \frac{R}{2}\right)$ ile $\left(ys + \frac{R}{2}\right)$ arasında düzgün dağılımlı olarak değişen $\left(u \times n \times \frac{N}{100}\right)$ adet düğümün y koordinatlarının oluşturulması gösterilmektedir.

$$\mathbf{yr} = \left(ys - \frac{R}{2}\right) + \left(R \times rand\left(1, u \times n \times \frac{N}{100}\right)\right) \quad (31)$$

Elde edilen uzaklık ve y koordinat değerleri kullanılarak düğümlerin x koordinatları aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$\mathbf{xr} = \left|xs - \sqrt{(\mathbf{uz} \odot \mathbf{uz}) - (ys - \mathbf{yr}) \odot (ys - \mathbf{yr})}\right| \quad (32)$$

Yukarıdaki denklemde $\odot$ işlevi noktasal çarpmayı göstermektedir. Denklemler (31) ve (32) ile BS'ye uzaklıkları 0 ile $\frac{R}{2}$ arasında düzgün dağılımlı değişen $\left(u \times n \times \frac{N}{100}\right)$ adet düğümün y ve x koordinatlarını içinde barındıran $\mathbf{yr}$ ve $\mathbf{xr}$ dizileri elde edilmiştir. Elde edilen bu y ve x koordinatları, N adet düğümden rastgele olarak seçilen $\left(u \times n \times \frac{N}{100}\right)$ adedine atanmıştır. Geri kalan $\left(N - \left(u \times n \times \frac{N}{100}\right)\right)$ adet düğümün $M \times M$ 'lik bir alana yerleştirildikleri varsayılarak BS'ye uzaklıkları $\frac{R}{2}$ 'den büyük olacak şekilde rastgele y ve x koordinatları oluşturulmuştur.

İstenen enerji ve uzaklık özelliklerine sahip düğümlerden oluşan bir ağ oluşturulduktan sonra $\mathbf{E}$ ve $\mathbf{C}$ dizilerinin elemanlarının olası tüm farklı kombinasyonlarının her biri için AHP kullanılarak eşik değerleri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$ec_1 = \frac{1}{2} \times \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{E(k)}} + \left(\frac{E(k)}{1 + E(k)} \right) \right), k = 1, 2, \dots, 18 \quad (33)$$

$$ec_2 = \frac{1}{2} \times \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{U(m)}} + \left(\frac{U(m)}{1 + U(m)} \right) \right), m = 1, 2, \dots, 18 \quad (34)$$

$$W_1 = \frac{1}{2} \times \left(\frac{1}{1 + \frac{1}{C(q)}} + \left(\frac{C(q)}{1 + C(q)} \right) \right), q = 1, 2, 3 \quad (35)$$

$$W_2 = 1 - W_1 \quad (36)$$

$$T(k, m, q) = (ec_1 \times W_1) + (ec_2 \times W_2) \quad (37)$$

Tüm enerji ve uzaklık durumuna karşılık gelen olası eşik değerleri $T(k, m, q)$ olarak saklanır. Olabilecek tüm eşik değerleri elde edildikten sonra bu eşik değerleri istenen enerji ve uzaklık özelliklerine uygun olarak düğümlerin rastgele konumlandığı bir ağda Denklem (28)'de belirtilen KB seçilme periyotları kullanılarak tek tek denenir. Bu amaçla düğümlerin KB olup olmamasında $T(k, m, q)$ eşik değeri kullanılır ve bir z düğümü ($z = 1, 2, \dots, N$) KB olup olmamaya $(0, 1]$ arasında düzgün dağılımlı olarak rastgele ürettiği bir a sayısının değerine göre aşağıdaki gibi karar verir.

$$a = rand; \begin{cases} \text{if } a \leq T(k, m, q) & \text{küme başkanı ol} \\ \text{if } a > T(k, m, q) & \text{küme başkanı olma} \end{cases} \quad (38)$$

Denklem (38)'e göre KB'ler belirlendikten sonra. KB olmayan düğümler kendilerine en yakın olan KB'yi kendi bulunacakları kümenin başkanı olarak seçerler ve bir sonraki KB seçim periyodu $\frac{1}{p_g}$ ($g = 1, 2, \dots, i$)'ye kadar paketlerini bu KB'ye gönderirler. p_g turlarının bitiminden sonra KB seçim dönemi yeniden başlar.

$D_{g,q}$ matrisinde $D_{g,q}(e, u)$ olarak saklanan eşik değerleri önerilen yöntemle şu şekilde hesaplanır: e, u çiftlerinin her birine göre; d_s adet farklı ağ oluşturulur. Oluşturulan ağlardaki düğümlerin enerjisi ve konumu Denklemler (29), (30), (31) ve (32)'deki gibi belirlenir. Oluşturulan ağlarda mümkün olan tüm eşik değerleri $T(k, m, q)$ kullanılır. d_s adet farklı ağın her biri için düğümlerin kalan enerjisinin toplamı ($energy_{g,q,e,u,G}(k, m)$; $G = 1, 2, \dots, d_s$) ve p_g döngülerinden sonra BS'ye ulaşan toplam paket sayısı hesaplanır.

Denklem (39) ve (40)'da tanımlanan $E_{g,q,e,u,G}(k,m)$ ve $P_{g,q,e,u,G}(k,m)$, kalan enerjinin ve BS'ye ulaşan toplam paketlerin normalleştirilmiş değerleridir.

$$E_{g,q,e,u,G}(k,m) = \frac{energy_{g,q,e,u,G}(k,m)}{\max(energy_{g,q,e,u,1}(k,m), energy_{g,q,e,u,2}(k,m), \dots, energy_{g,q,e,u,d_s}(k,m))} \quad (39)$$

$$P_{g,q,e,u,G}(k,m) = \frac{packet_{g,q,e,u,G}(k,m)}{\max(packet_{g,q,e,u,1}(k,m), packet_{g,q,e,u,2}(k,m), \dots, packet_{g,q,e,u,d_s}(k,m))} \quad (40)$$

$k_{max,G} \in \{1,2, \dots, 18\}$, $m_{max,G} \in \{1,2, \dots, 18\}$ içerisindeki indeks numaraları her d_s deney için Denklemler (41) ve (42) ile bulunur. $k_{max,G}$ ve $m_{max,G}$ 'ye karşılık gelen toplam d_s eşik değerlerinin ortalama değeri $T(k_{max,G}, m_{max,G}, g, q)$, $\mathbf{D}_{g,q}$ matrisinde $D_{g,q}(e, u)$ olarak saklanır.

$$(k_{max,G}, m_{max,G}) = \max_{k,m} (E_{g,q,e,u,G}(k,m)) \quad (41)$$

$$(k_{max,G}, m_{max,G}) = \max_{k,m} (E_{g,q,e,u,G}(k,m) + P_{g,q,e,u,G}(k,m)) \quad (42)$$

$$D_{g,q}(e, u) = \frac{1}{d_s} \sum_{G=1}^{d_s} T(k_{max,G}, m_{max,G}, q, g) \quad (43)$$

$\mathbf{D}_{g,q}$ matrisi çevrimdışı olarak hesaplanır ve düğümlerin hafızasında saklanır. Düğümler herhangi bir merkezi kontrol olmadan g , q , e ve u değerlerine göre KB olmak için $D_{g,q}(e, u)$ eşik değerini kullanabilir. Algoritma-1, önerilen yöntemle tüm olası eşik değerlerinin belirlenmesini göstermektedir (Gangal, Cinemre, & Hacıoglu, 2024).

Algoritma-1

1: *Başla*

2: *Deneme sayısını, $\mathbf{ds}$ tanımla.*

3: *$\mathbf{D}$ matrisinin boyutunu tanımla.*

4: *$\mathbf{P}$ dizisini tanımla.*

5: *$\mathbf{C}$ dizisini tanımla.*

Algoritma-1 devamı

6: **E** ve **U** dizilerinden birini tanımlayın.

7: AHP'yi ve **C**, **E** dizilerinin elemanlarını kullanarak olası tüm eşik değerlerini hesaplayın. Eşik değerlerini **T** olarak adlandırılan bir matriste saklayın. **T** matrisinin elemanları **T(k, m, q)** olarak tanımlanır.

8: $e = 1, 2, \dots, n$ için 8'den 18'e kadar olan adımları tekrar et

9: $u = 1, 2, \dots, n$ için 9'dan 18'e kadar olan adımları tekrar et

10: $g = 1, 2, \dots, i$ için 10'dan 17'ye kadarki adımları tekrar et ve Denklem (28) de tanımlanan p_g kullanın.

11: $q = 1, 2, 3$ için 11'den 17'ye kadarki adımları tekrarla ve denklem (24) te tanımlanan **C(q)** kullanın

12: $G = 1, 2, \dots, d_s$ için 12'den 17'ye kadarki adımları tekrarlayın

13: $\%(e - 1) \times \frac{100}{n}$ ile $\%e \times \frac{100}{n}$ arasında düğümlerin daha az enerjiye sahip olduğu bir ağ oluşturun.

14: Düğümlerin $\%(u - 1) \times \frac{100}{n}$ ile $\%u \times \frac{100}{n}$ 'inin BS'ye daha yakın olduğu bir ağ oluşturun.

15: Bütün mümkün eşik değerlerini **T(k, m, q)** kullanın. Toplam kalan enerjiyi (**energy**_{g,q,e,u,G}(**k, m**)) ve BS'ye ulaşan toplam paket sayısını (**packet**_{g,q,e,u,G}(**k, m**)) oluşturulan ağ için KB seçiminin ikinci periyodunun başlangıcına dek hesaplayın ve **energy**_{g,q,e,u,G}(**k, m**) ve **packet**_{g,q,e,u,G}(**k, m**) değerlerini Denklem (39) ve (40)'da verildiği gibi normalize edin

16: **k**_{max,G} ve **m**_{max,G} değerlerini bulmak için Denklem (41) ve (42)'i kullanın

17: **T(k**_{max,G}, **m**_{max,G}, **q**) değerini saklayın

18: Saklanan **T(k**_{max,G}, **m**_{max,G}, **q**) değerlerinin ortalama değerini hesaplayın (Denklem (43)) ve **D**_{g,q}(**e, u**) olarak saklayın.

Yukarıdaki Denklem (43)'te k değişkeni ağdaki toplam enerjinin önemini, m değişkeni ağdaki düğümlerin baza olan uzaklıklarının önemini belirtir. Yine q değişkeni enerji kriterinin uzaklık kriterine göre üstünlük derecesini ve $g = 1, 2, \dots, i$ KB seçilme periyodunu ifade eder. $D(e, u)$ değerine karşılık gelen eşik değeri olarak $E_R(k, m, q, g)$ 'nin

maksimum olduğu k , m ve q indeks değerlerinden $\frac{1}{p_g}$ KB belirleme periyodu için $T(k, m, q)$ eşik değeri belirlenir.

Bu işlemlerin ağın büyüklüğüne ve BS'nin konumuna göre sadece bir kere yapılması yeterlidir. Artık her bir düğüm kendi E ve U değerine göre belleğinde olan D matrisinden ilgili T değerini seçer ve küme başkanı seçimi bu şekilde yapılır. Şekil 14'te genel bir özet akış sunulmuştur. Ayrıca önerilen yöntemin detaylı akış diyagramı Ek-1'de verilmiştir.



Şekil 14. Herhangi bir topoloji için eşik değeri (T) belirleme süreci.

2.2. YSA Destekli Küme Başkanı Seçim Yöntemi

YSA Destekli Küme Başkanı Seçim Yöntemi ile ilgili olarak kablosuz algılayıcı ağlarında enerji açısından verimli küme başkanı seçimi yöntemlerini ele alan son yıllardaki önemli yayınlar Tablo 7'de gösterilmiştir. Bu çalışmalara ait önemli bilgiler aşağıda özetlenmiştir. Örneğin Wang vd. (2020) tarafından küme başkanlarını seçmek için geliştirilmiş yapay arı kolonisi algoritması kullanan bir kümeleme algoritması önerilmiştir. Karaboğa vd. (2005) tarafından geliştirilen Yapay Arı Kolonisi (ABC) algoritması, bal arılarının yiyecek arama davranışlarından esinlenerek sayısal optimizasyon için sürü tabanlı bir metasezgisel algoritmadır. Tereshko ve Loengarov'un (2005) bir modeline dayanan bu

algoritma, yiyecek kaynakları (çözümler) arayan ve pozitif ve negatif geri bildirim mekanizmalarını içeren çalışan ve işsiz arıları içerir. ABC, yapay arıların başlangıç çözümlerini yinelemeli olarak keşfetmesini ve iyileştirmesini içerir ve bu da onu optimum çözümleri bulmada etkili hale getirir. ABC, basitliği, esnekliği ve sağlamlığı nedeniyle çeşitli optimizasyon problemlerini çözmek için etkilidir. Algoritma standart ABC algoritmasına dayanmaktadır ancak verimli bir geliştirilmiş ABC algoritması içerir. Geliştirilmiş ABC algoritması, kablosuz sensör ağlarındaki kümeleme problemlerini çözmek için küme başkanı enerjisi, küme başkanı yoğunluğu, küme başkanı konumu ve diğer benzer faktörleri içerir. En uygun kümeleme yöntemini bulmak için Fuzzy C-MEANS kümelemesi, geliştirilmiş ABC algoritması kullanılarak optimize edilir. Wang ve diğerleri çalışmalarını üç farklı simülasyon senaryosu için gerçekleştirdiler; bu çalışmayı LEACH-C, uygunluk değeri tabanlı Geliştirilmiş GWO (FIGWO), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve ABC-SD tabanlı çalışmalarla karşılaştırdılar. Burada GWO hakkında kısa bir bilgi vermek gerekirse, Gri Kurt Optimizasyonu (GWO) Mirjalili vd. (2014) tarafından tanıtılmış ve gri kurtların davranışlarından esinlenmiştir. Gri kurtlar sürülerinde alfa, beta, delta ve omega kurtlarından oluşan net bir liderlik hiyerarşisine sahiptir. Bu hiyerarşi, arama, kuşatma ve saldırı gibi avlanma stratejileri için çok önemlidir. GWO bu liderlik ve avlanma taktiklerini taklit eder ve matematiksel bir model olarak geliştirilmiştir. Öte yandan Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Eberhart ve Kennedy (1995) tarafından geliştirilen bir algoritmadır. Kuşların ve balıkların sosyal davranışlarından esinlenmiştir ve bir parçacık sürüsü aracılığıyla aday çözümleri yinelemeli olarak iyileştirerek çalışır. Her parçacık potansiyel bir çözümü temsil eder ve çözüm uzayında kendi en iyi konumuna (pBest) ve sürü tarafından bulunan en iyi konuma (gBest) göre hareket eder. Parçacıkların hızları ve konumları, çeşitli keşifleri sağlamak için bu en iyi konumlar ve rastgele faktörler kullanılarak yinelemeli olarak güncellenir. PSO, karmaşık optimizasyon problemlerini ele almadaki basitliği ve etkinliği nedeniyle fonksiyon optimizasyonu, sinir ağı eğitimi, kontrol sistemleri ve görüntü işleme için yaygın olarak kullanılır. Wang ve diğerleri, simülasyon sonuçlarını dikkate alarak önerilen algoritmanın enerji tüketim dengesi, enerji verimliliği, ağ ömrü, ağ kararlılık süresi ve ağ verimi açısından iyi performans gösterdiğini ifade ettiler (Wang, Ding, Li, Bao, & Yang, 2020).

Nezha vd. (2021) ağ ömrü ve enerji verimliliği açısından kablosuz algılayıcı ağlarının (KAA) performansını optimize etmeyi amaçlayan Enerji Farkında Kümeleme ve Verimli Küme Başkanı Seçimi (EAC-ECHS) adı verilen yeni bir metodoloji tanıttı. EAC-ECHS'de,

sensör ağı şebekeler arası ve eşit şekilde kümelenmiş ağlara bölünür. Ayrıca, her kümelenmiş ızgara için küme başkanı seçimi, sensör kalan enerjisi, komşulara olan uzaklık ve baz istasyonuna yakınlık gibi faktörlere dayanır. EAC-ECHS'nin performansını LEACH, Routing G5 ve OSCH G6 dahil olmak üzere diğer protokollere karşı değerlendirmek için karşılaştırmalı analiz yürütülmüştür. Bulgular, EAC-ECHS yaklaşımının enerji tüketimi, ağ ömrü ve paket teslim oranı açısından tasarım hedeflerini etkili bir şekilde karşıladığını göstermektedir.

Wu vd. (2022) K-Means ve Canopy optimizasyonuna dayanan DCK-LEACH adı verilen çift küme başlı enerji açısından verimli bir algoritma önermiştir. K-Means algoritması ilk kümeleme merkezlerinin konumuna duyarlı olduğundan, bu algoritma kümeleme için hem dinamik Canopy algoritmasını hem de K-Means algoritmasını kullanır. Küme başkanı seçiminde DCK-LEACH, küme başkanı ek yükünü en aza indirmek ve ağ yükünü dengelemek için hiyerarşik bir yaklaşım benimser. Birincil küme başkanı iki kriterle göre belirlenir: Düğümün kalan enerjisi ve kümeleme merkezinden uzaklığı. Bu arada, yardımcı küme başkanı, düğümün kalan enerjisi ve baz istasyonundan uzaklığı dikkate alınarak seçilir. Simülasyon sonuçları, DCK-LEACH'in enerji açısından kritik düğümlerin ömrünü ve genel ağ ömrünü LEACH, K-LEACH, IEECHS-WSN ve RCH-LEACH gibi mevcut protokollere kıyasla önemli ölçüde uzattığını göstermektedir.

Pour ve Javidan (2021), küme başkanlarının seçimi için DRE-LEACH adı verilen yeni bir enerji verimli algoritma tanıttı. Bu algoritma, KB'leri kalan enerji, düğüm konumu ve merkezilik dahil olmak üzere çeşitli faktörlere göre seçer. DRE-LEACH, düğüm merkeziliğini ve komşu sayısını hesaplamak için dinamik bir aralık kullanır. Simülasyon sonuçları, önerilen bu algoritmanın enerji tüketimini azaltma, ağ ömrünü uzatma ve ağ güvenilirliğini artırma açısından LEACH, LEACH ile Çok Duraklı Yönlendirme (MR-LEACH) ve Gelişmiş Çok Duraklı LEACH'i (EM-LEACH) geride bıraktığını göstermektedir.

Gulbas ve Cetin (2023) tarafından yürütülen bir çalışmada, enerji kayıplarını en aza indirerek kablosuz algılayıcı ağlarının ömrünü iyileştirmek için iki yaklaşım geliştirilmiştir. LEACH yönlendirme protokolünü kullanmışlar ve yaklaşımlarını Simüle Tavlama (SA) algoritmasına dayandırmışlardır. LEACH-SA ve PSCH-SA olarak adlandırılan her iki teknik de küme başkanlarını belirlerken düğümler arasındaki kalan enerjileri ve mesafeleri dikkate almaktadır. Araştırmacılar simülasyonlar yürütmüş ve her iki yöntemin sonuçlarını LEACH ile karşılaştırmışlardır. PSCH-SA'nın 10 sensörlü ağlarda daha iyi performans gösterdiğini,

LEACH-SA'nın ise 25 veya daha fazla sensörlü KAA'larda üstün performans gösterdiğini ifade etmişlerdir.

KAA'lar içindeki küme başkanı seçme sürecinde, yapay sinir ağının (YSA) kullanımını içeren Debasis ve diğerlerinin yayını da incelenmiştir. (Debasis, Sharma, Bohat, & Bhadoria, 2023). Belirlenen coğrafi alan daha küçük bölgelere ayrılır ve her bölgede YSA'nın uygulanmasıyla seçilen bir küme başkanı bulunur. Minimum enerji eşiğini karşılamak, bir düğümün potansiyel bir KB olarak nitelendirilmesi için bir ön koşuldur. YSA, KB olarak uygunluğunu belirlemek için ilgili düğümün kalan enerji seviyesini, tespit edilen olayların kümülatif sayısını, baz istasyonuna yakınlığı ve komşu düğümlerin sayısını kapsayan bir dizi değişkeni değerlendirir.

Bu çalışmada, ağın enerji tüketimini azaltmak amacıyla, LEACH algoritmasında da kullanılan, her düğüm için ayrı ayrı küme başkanı seçimi için eşik değerinin bir YSA yardımıyla belirlenmesi amaçlanmaktadır. Düğüm koordinatlarının ve BS'nin sabit olduğu bu senaryoda düğümler, baz istasyonuna olan uzaklıklarına göre dört farklı kategoriye ayrılmaktadır. Önerilen yöntem, her düğümde önceden eğitilmiş bir YSA'nın bulunduğunu varsaymaktadır. YSA'nın girdileri, düğümün başlangıç enerji değeri, mevcut enerji değeri, kategori bilgisi ve olası eşik değerlerinden oluşmaktadır.

Düğüm, YSA'ya girdi olarak bir dizi olası eşik değeri sağlayarak, aldığı çıktıya göre hangi eşik değerinin kullanılacağına karar verir.

Önerilen yöntem, LEACH algoritmasının dağıtılmış küme oluşturma mekanizmasını kullanmaktadır ancak eşik değerleri, önceki deneyimlere dayanarak eğitilen yapay zeka modeline başvurulularak belirlenmektedir.

Tablo 7. Güncel bazı çalışmalar

Referans	Kısa Özet	Kısıtlar
Wang ve diğerleri, (2020)	Kablosuz algılayıcı ağlarında küme başkanı seçimi için geliştirilmiş bir Yapay Arı Kolonisi (ABC) algoritması önerdiler ve enerji verimliliği, ağ ömrü ve ağ verimliliği için Fuzzy C-Means kümelemeyi optimize ettiler.	ABC algoritması için seçilen parametrelere büyük ölçüde bağlıdır ve farklı senaryolar için ayarlama gerektirebilir.
Mirjalili ve diğerleri, (2014)	Gri Kurt Optimizatörü'nü (GWO), kurtların liderlik hiyerarşisi ve avlanma davranışlarından esinlenerek tanıttılar ve çeşitli optimizasyon problemlerine uyguladılar.	GWO'nun hiyerarşi ve avlanma stratejisi doğası gereği, yerel optimumlara takılıp kalabilir veya erken yakınsama gösterebilir.
Nezha ve diğerleri, (2021)	Kablosuz algılayıcı ağlarının optimizasyonu için enerji, mesafe ve yakınlık gibi faktörlere dayalı küme başkanı seçimiyle inter-grid kümeleme yöntemi olan EAC-ECHS yöntemini tanıttılar, enerji verimliliği ve ağ ömrünü iyileştirdiler.	Gridlerin yönetiminde ek yük ve karmaşıklık getirebilir, bu da ölçeklenebilirliği sınırlayabilir.
Wu ve diğerleri, (2022)	K-means ve Canopy optimizasyonunu birleştiren ikili küme başı seçimi için DCK-LEACH algoritmasını önerdiler, LEACH, K-LEACH ve diğer protokollere kıyasla ağ ömrünü önemli ölçüde uzattılar.	K-means'deki ilk kümeleme merkezlerinin konumuna duyarlılık performansı etkileyebilir; Canopy algoritması ek hesaplama yükü getirir.

Tablo 7'nin devamı

Gulbas ve Cetin, (2023)	Enerji kayıplarını en aza indirmek için Simulated Annealing (SA) algoritmasına dayalı iki yöntem geliştirdiler: PSCH-SA küçük ağlarda, LEACH-SA ise daha büyük ağlarda üstün performans göstermiştir.	SA tabanlı yaklaşımlar, yavaş yakınsama gösterebilir ve daha büyük ağlar için önemli hesaplama kaynakları gerektirebilir.
Debasis ve diğerleri, (2023)	Enerji seviyesi, olay sayısı, yakınlık ve komşu düğüm sayısını göz önünde bulundurarak, alt bölgelere ayrılmış alanlarda küme başkanı seçimi için Yapay Sinir Ağı (YSA) kullanılmıştır.	YSA tabanlı seçim, önemli miktarda eğitim verisi ve hesaplama kaynakları gerektirebilir ve performans büyük ölçüde ağ topolojisine bağlıdır.

2.2.1. Önerilen Eşik Belirleme Yöntemi

Yapay sinir ağları, daha evvel ifade edildiği üzere canlıların beyinlerinden ilham alan, birbirine bağlı birçok düğümü içeren karmaşık problemleri çözmede oldukça başarılı olan sistemlerdir. Bir YSA'da, düğümleri birbirine bağlayan her bağlantıya ağırlık katsayıları atanır ve YSA, bu süreçten öğrenerek, bilinen giriş ve çıkışları içeren bir veri kümesi kullanarak bu ağırlık katsayılarını ayarlar. YSA bir öğrenme modelidir ve doğruluğu, kendisine sunulan eğitim verilerinin kalitesine bağlıdır. Algoritmik ve ayarlama seçeneklerinin yanı sıra, iyi dağıtılmış, yeterli ve doğru ölçülmüş bir veri setine sahip olmak, doğru bir model elde etmek için bir ön koşuldur. Bu nedenle veri ön işleme, bir YSA öğrenme modeli elde etmek için temel bir prosedürdür (Jo, Park, Lee, Choi, & Park, 2020). YSA'da öğrenmenin amacı, verilen öğrenme verileri üzerinde doğru tahminler sağlayan en uygun ağırlıkları bulmaktır.

Önerilen yöntemde, düğümler mevcut enerji seviyelerine ($E_{current}$), başlangıç enerji seviyelerine (E_{init}) ve kategorilerine (CT) göre potansiyel eşik değerlerini seçmek için yapay sinir ağı kullanır. Bu nedenle YSA'nın eğitimi için bir veri setine ihtiyaç vardır. Ayrıca önerilen yöntemde küme başkanı seçimi, bir tur yerine 100 tur sonra gerçekleşmesi açısından LEACH algoritmasından farklılık göstermektedir. Bir tur, tüm düğümlerin küme başkanı ile yalnızca bir kez iletişim kurduğu anlamına gelir. Veri setini oluşturmak için, 100x100 metrelik bir alanın merkezinde bulunan bir BS ile 100 düğümden oluşan bir ağ kullanılmıştır. Her düğümün başlangıç enerji seviyeleri (E_{init}) ve eşik değerleri (T) rastgele atanmıştır. Maksimum başlangıç enerji değeri, 0.05'lik bir adımla 0.05 ile 0.5 arasında ayarlanmıştır. Her bir maksimum enerji değeri için 200 test turu gerçekleştirilmiş ve sonuçta başlangıç enerji değerlerini içeren bir $E_{initial}$ dizisi elde edilmiştir.

Veri kümesini oluşturmak için, ilk olarak düğümlerin olası başlangıç enerjisi olarak E_0 seçilmiştir. Ardından, $E_{init} = E_0 \times rand$ formülünü kullanılarak her düğümün E_{init} değerini atanmıştır. Burada $rand$, 0 ile 1 arasında değerler alan tekdüze bir rastgele değişkendir. Küme başkanı seçimi için kullanılan 100 turdan sonra, kalan enerji değerleri saklanır. Ardından, düğümlerin enerji seviyeleri 100 turun başında rastgele atanan ilk enerji değerlerine ayarlanmıştır. Bu işlem 200 kez tekrarlanmış ve daha sonra E_0 , E_1 olarak değiştirilmiş ve düğümlerin başlangıç enerji değerleri $E_{init} = E_j \times rand$ kullanılarak tekrar rastgele atanmıştır, burada $j = 0, 1, \dots, g - 1$ 'dir.

$$E_{initial} = [E_0 \quad E_1 \quad \dots \quad E_{g-1}] \quad (44)$$

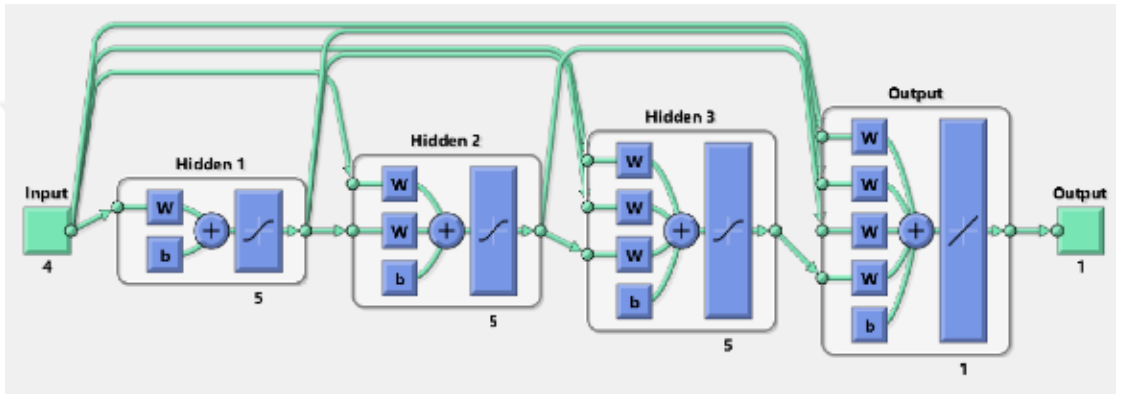
Düğümler, BS'ye olan uzaklıklarına göre dört kategoriye ayrılmıştır: 15 m içindeki düğümler $CT = 1$, 15-25 m arasındaki düğümler $CT = 2$, 25-35 m arasındaki düğümler $CT = 3$ ve 35 m'nin üzerindeki düğümler $CT = 4$ olarak sınıflandırılmıştır.

Her denemenin sonunda E_{init} , $E_{current}$, T ve CT değerleri YSA eğitimi için girdi olarak saklanmıştır. Her düğümün kalan enerjisi (E_{remain}) YSA eğitiminde kullanılmak üzere çıktı olarak kaydedilmiştir. Baz istasyonu da dahil olmak üzere tüm düğümlerin sabit olduğu varsayılmıştır. Genel olarak, 200.000 veri noktasından oluşan bir veri kümesi oluşturulmuştur.

Bu çalışmada kaskat YSA kullanılmıştır. kaskat YSA'da girişten ve her katmandan sonraki katmanlara bağlantılar vardır. kaskat YSA, 200.000 örnekten oluşan veri kümesi oluşturulduktan sonra MATLAB Neural Network Toolbox kullanılarak eğitilmiştir.

YSA'nın dört girdisi vardır: mevcut enerjinin başlangıç enerjisine oranı olan enerji oranı (R) (Denklem (45) kullanılarak hesaplanmıştır), eşik değeri (T), başlangıç enerjisi (E_{init}) ve kategori değeri (CT). YSA'nın çıktısı kalan enerjidir (E_{remain}). İlgili YSA'yı temsil eden blok diyagram Şekil 15'te verilmiştir.

$$R = \frac{E_{current}}{E_{init}} \quad (45)$$



Şekil 15. MATLAB ortamında uygulanan 5-5-5 gizli katmanlı YSA'nın blok diyagramı

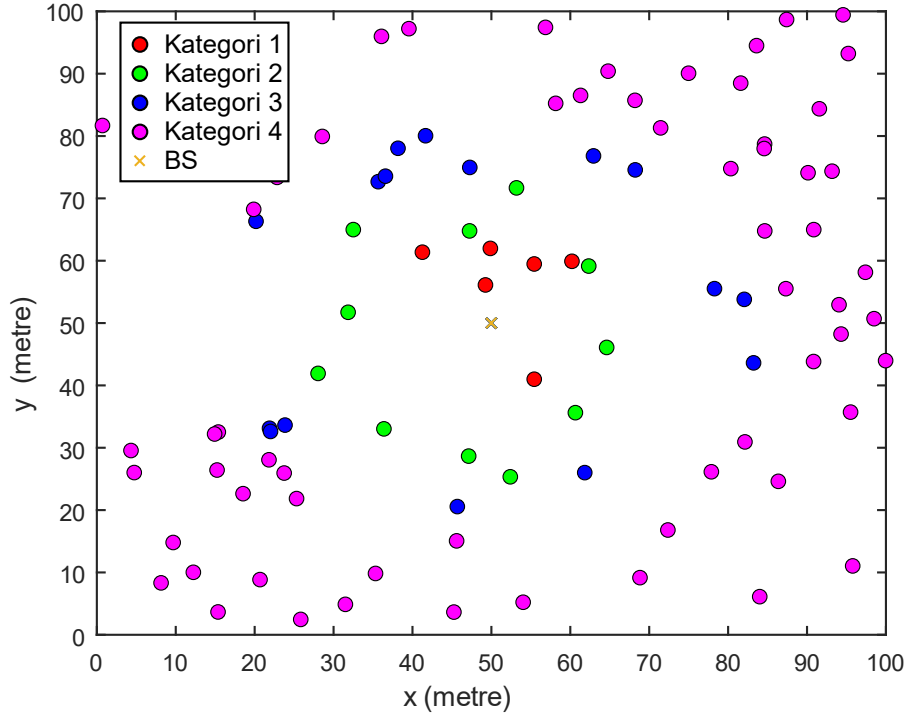
Alıcı ve verici devrelerinde tek bir biti işlemek için gereken enerji E_{elec} olarak verilir. Bu arada, yükselteç için enerji katsayısı E_{amp} ile gösterilir. Şekil 16 dört ana kategoriye ait düğümleri ve bu düğümlerin ağdaki konumlarını göstermektedir. Ek olarak Tablo 8 düğümlerin BS'ye olan uzaklıklarına göre kategorizasyonunu göstermektedir.

Her bir düğüm kategorisi için, mevcut enerjinin başlangıç enerjisine oranı olan enerji oranı (R) bir değişken olarak saklanır. Bu değişken, her düğümde depolanan önceden eğitilmiş YSA'ya olası eşik değerlerinin (0 ile 1 arasında değişen) ve R , E_{init} ve CT değişkenlerinin girdi olarak verilmesini içeren küme başı seçim sürecinde kullanılır. YSA'nın çıktısı, düğümün T_p eşik değeri dizisinden seçilen olası bir $T \in T_p$ eşik değerini kullanması durumunda düğümün kalan enerjisidir. Denklem (46), T_0 ile T_{m-1} arasındaki eşik değerlerinden oluşan bir satır vektörü olan eşik değer dizisini göstermektedir.

$$T_p = [T_0 \quad T_1 \quad \cdots \quad T_{m-1}] \quad (46)$$

Tablo 8. BS'den uzaklıklarına göre düğümlerin kategorileri

Uzaklık (metre)	Kategori
$U < 15$	1
$15 \leq U < 25$	2
$25 \leq U < 35$	3
$U \geq 35$	4



Şekil 16. Düğümlerin BS'den uzaklıklarına göre kategorizasyonu

Sinir ağı çıktısı E_{remain} olduğundan, en büyük E_{remain} 'i veren olası T değerlerine karşılık gelen eşik değerleri dizisindeki (T_p) elemanın indeksi, tüm olası eşik değerleri tek tek denenerek bulunabilir.

$$T = \arg \max_{T_i \in T_p} E_{remain} ; i = 0, 1, \dots, m - 1 \quad (47)$$

Her düğümün kendi YSA'sına ve hafızasında kayıtlı T_p 'ye sahip olduğu ve böylece kullanılacak en uygun eşik değerini belirleyebildiği varsayılmaktadır. 100 turdan sonra, her düğüm kullanılacak en uygun eşik değerini belirlemek için kendi YSA'sını kullanma sürecini tekrarlar.



3. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, önerilen Dağıtık LEACH-AHP metodu ve YSA Destekli Küme Başkanı Seçim Yöntemine ilişkin bulgular ele alınarak değerlendirilecek ve sonuçları tartışılacaktır.

3.1. Dağıtık LEACH-AHP Yöntemine Dair Bulgular

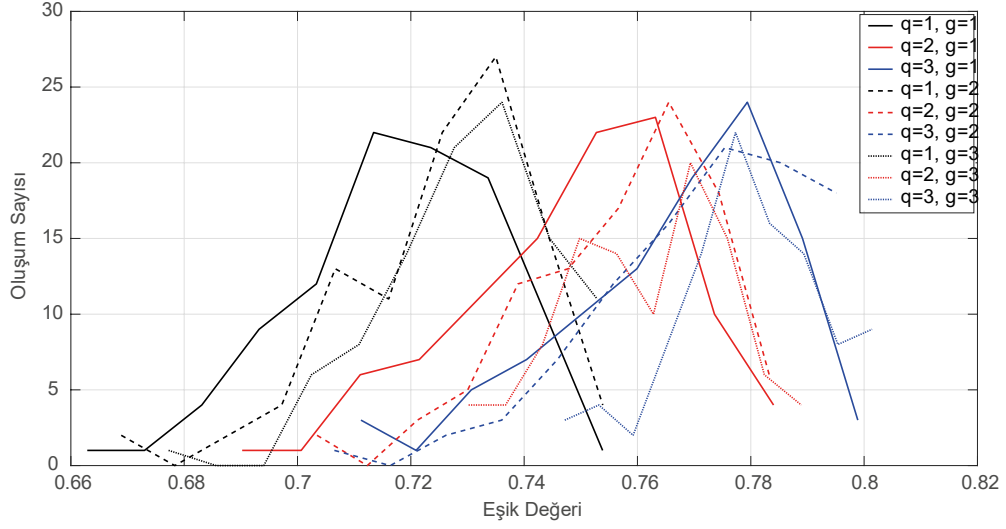
Bu yaklaşım esasen iki bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde veri seti oluşturulmuş ve buradan $D_{g,q}(e, u)$ değerleri elde edilmiştir. İkinci kısımda ise bu eşik değerleri kullanılarak belirli bir ağın performansı incelenmiştir. Çalışmalarda kullanılan parametreler aşağıdaki gibidir.

Tablo 9. Simülasyonlarda kullanılan parametrelere ait değerler

Parametre	Değer
Ağ boyutu	100×100 (örneğin $M = 100$)
Düğüm sayısı	$N = 100$
Durum sayısı	$n = 10$
Küme başkanı seçim periyodu	$P = [100,150,200]$
Enerjinin önem değerleri	$C = [3,5,7]$
Düğümünün maksimum enerjisi	$e_{max} = 0.5$
Baz istasyonu (BS) konumu	(50,50), (200,200)
Her durumun denenme sayısı	$H = 100$
Düğümünün konumları	x ve y koordinatları rastgeledir (0-100)

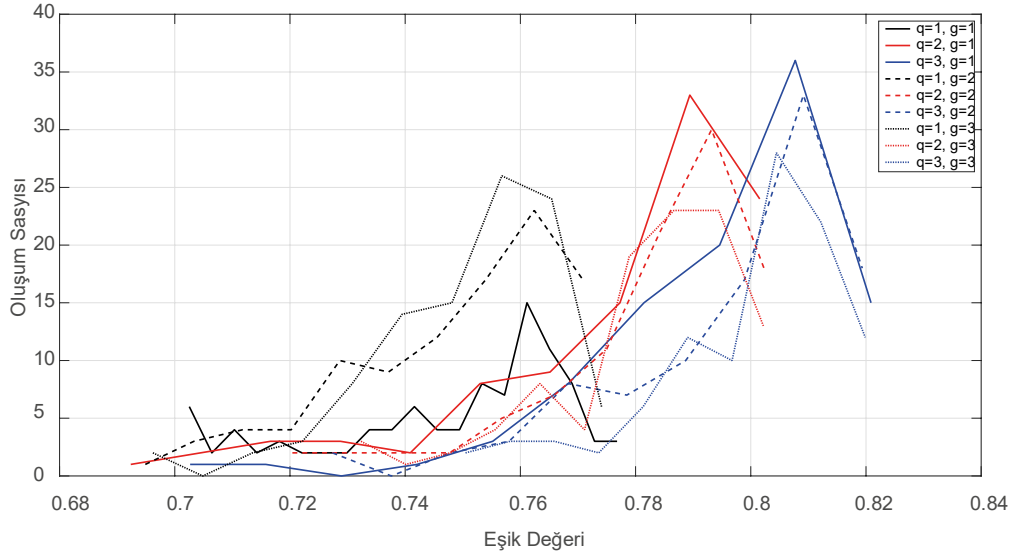
Algoritma-1 ile elde edilen sonuçlara göre $D_{g,q}$ matrislerinde saklanan eşik değerlerinin görülme sayıları aşağıda gösterilmiştir.

Şekil 17 ve Şekil 18, ağın toplam enerjisi dikkate alındığında Denklem (41)'e göre $D_{g,q}(e, u)$ değerlerinin değişimini göstermektedir. Şekil 17'de gösterilen sonuçlara göre; eğer BS 100×100 alanının merkezine yerleştirilirse eşik değerler 0.66 ile 0.80 arasında değişmektedir. Öte yandan, BS uzaktayken enerjinin önemi (q) arttıkça eşik değerler de artmaktadır. Küme başkanı seçim periyodunun (p_g) değişimi, eşik değerler üzerinde önemli bir değişime neden olmamaktadır.



Şekil 17. Denklem (41)'e göre elde edilen ve BS'nin ağıın merkezinde olduğu duruma ait eşik değerleri ve oluşum sayıları

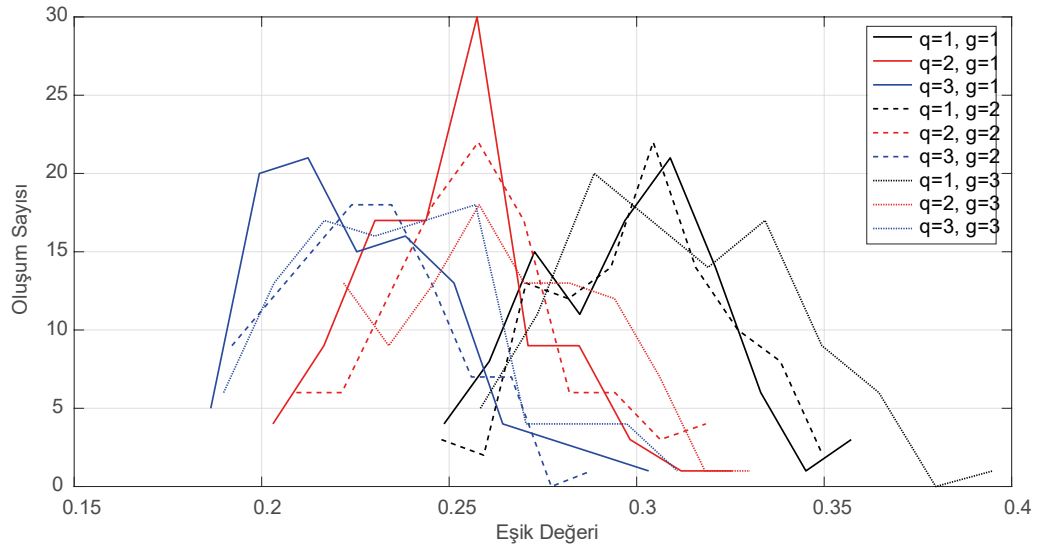
Şekil 18, BS'nin (200,200) konumuna yerleştirildiğinde eşik değerlerin değişimini göstermektedir. Şekil 18'de gösterilen sonuçlara göre, Denklem (41) ile elde edilen eşik değerler biraz artarak 0.69 ile 0.82 arasında değişmektedir. Daha yüksek eşik değerleri, daha fazla düğümün küme başkanı olmaya istekli olduğunu ifade eder. Daha fazla küme başkanı, diğer düğümlerin daha yakın bir küme başkanı bulma fırsatına sahip olmalarını sağlar. Ancak, küme başkanlarının diğer düğümlerden daha fazla enerji tüketmesi beklenir. Örneğin, Şekil 17'de $p_g = 100$ ve $C(q) = 7$ için eşik değerlerin ortalaması 0.766 olarak bulunmuştur, bu da düğümlerin %76.6'sının küme başkanı olmaya istekli olduğunu gösterir. Yani her düğüm, 10 küme başkanı seçim döneminin sonunda yaklaşık 8 kez küme başkanı ve 2 kez normal düğüm olabilir. Dolayısıyla düğüm, sekiz küme başkanı seçim dönemi boyunca daha fazla enerji tüketir ve diğer iki seçim dönemi boyunca daha az enerji tüketir. BS (200,200) konumuna yerleştirilmiş olup, ağdaki bir küme başkanından en az $100\sqrt{2}$ metre uzaklıktadır. Ancak, Şekil 18'de görüldüğü gibi, BS düğümlerden uzakta yer alsan bile eşik değerlerin ortalamasında büyük bir değişiklik yoktur. $p_g = 100$ ve $C(q) = 7$ için, Şekil 18'de eşik değerlerin ortalaması 0.796 olarak bulunmuştur.



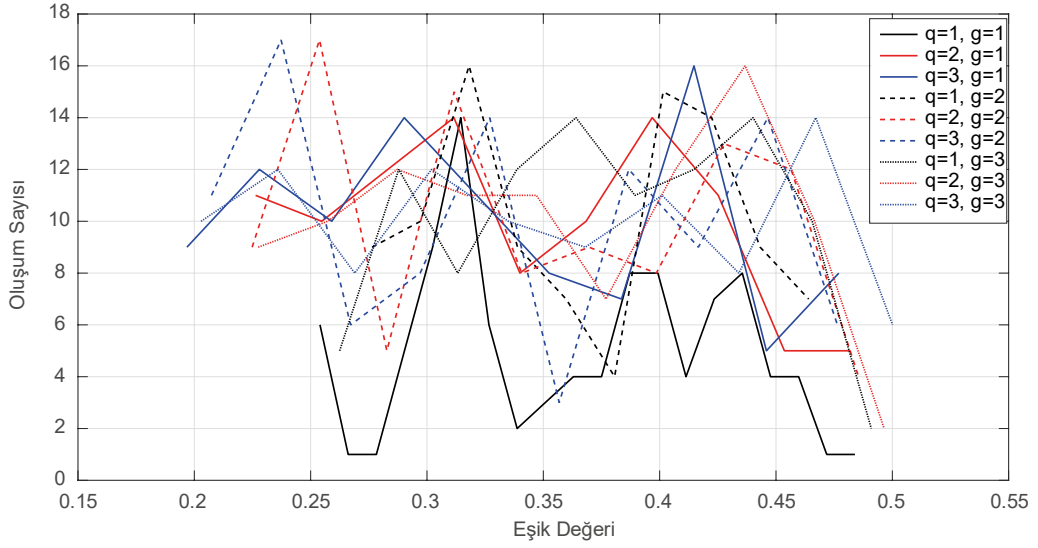
Şekil 18. Denklem (41)'e göre elde edilen ve BS'nin uzakta olduğu duruma ait eşik değerleri ve oluşum sayıları

Şekil 17 ve Şekil 18'de gösterilen sonuçlara göre, eşik değerler geniş bir aralıktaki değişmeyen değerlere sahiptir. Eşik değerlerin ortalama değeri, her küme seçim dönemi sonunda komşu düğümlerin durumu hakkında bilgi edinmek için gereken iletişim yükünü ortadan kaldırmak amacıyla tek bir eşik değeri olarak kullanılabilir.

Şekil 19 ve Şekil 20, enerji ve BS'ye ulaşan toplam paketlerin toplamı Denklem (42) dikkate alındığında $D_{g,q}(e, u)$ değerlerinin değişimini göstermektedir.



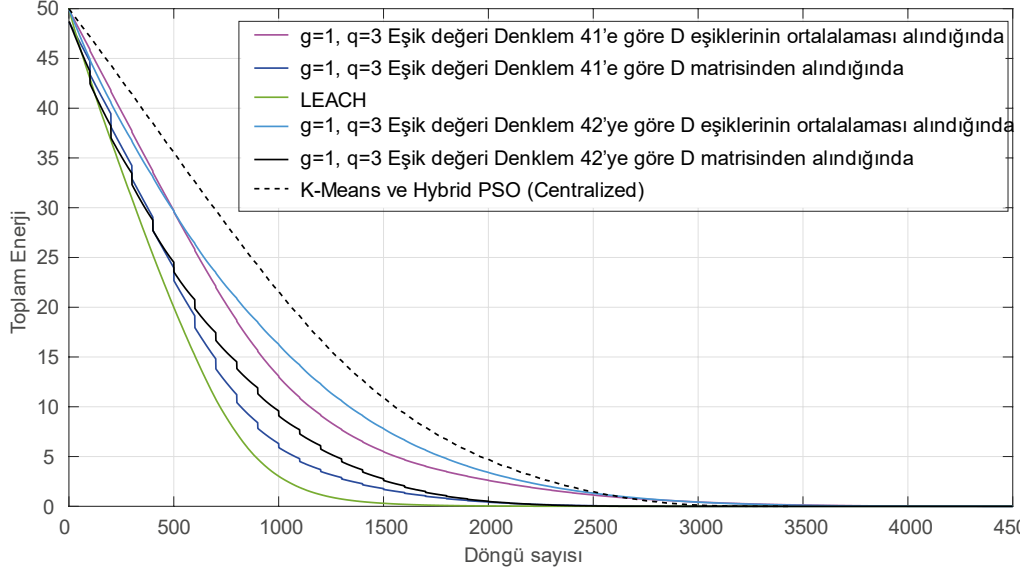
Şekil 19. Denklem (42)'ye göre elde edilen ve BS'nin ağına merkezinde olduğu duruma ait eşik değerleri ve oluşum sayıları



Şekil 20. Denklem (42)'ye göre elde edilen ve BS'nin ağdan uzakta olduğu duruma ait eşik değerleri ve oluşum sayıları

Eşik değerler Şekil 19'da 0.18 ile 0.39 arasında ve Şekil 20'de 0.19 ile 0.5 arasında değişmektedir. Şekil 19'da gösterilen sonuçlara göre, enerjinin uzaklığa olan üstünlüğü (q) arttıkça eşik değerler azalmaktadır. Ancak, Şekil 17 ve Şekil 18'de ise aynı durumda eşik değerler artmaktadır. Aynı zamanda eşik değerler Şekil 17 ve Şekil 18'deki eşik değerlerden daha düşüktür. Daha düşük eşik değerler, daha az sayıda küme başkanı anlamına gelir ve daha az sayıda küme başkanı, kümelerin daha fazla üye düğüme sahip olduğu anlamına gelir. Daha büyük kümeler, BS'ye iletmek için daha fazla paket toplar. KB'ler alıcıya daha fazla paket iletirlerse, daha fazla enerji tüketirler ve bu da diğer turlarda potansiyel KB'lerin üyelerinden daha uzak olmasına neden olur. Şekil 21, ağın toplam enerjisinin değişimini göstermektedir.

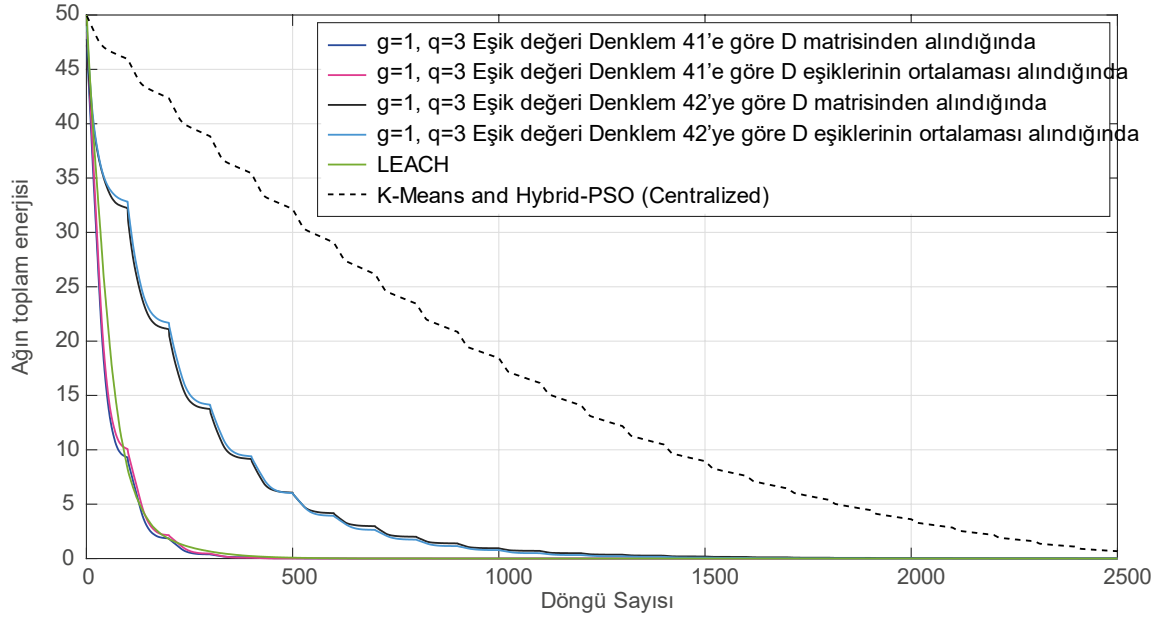
Ağın performansı ile ilgili tüm simülasyon sonuçları, simülatörün yüz kez çalıştırılmasıyla elde edilen sonuçların ortalaması alınarak elde edilmiştir. g ve q 'nin tüm olası değerleri kullanılarak elde edilen tüm sonuçlar Tablo 10'da verilmiştir, ancak bazı sonuçlar şekillerde verilmiştir. Şekil 21'deki sonuçlara göre, daha düşük eşik değerler, yüksek enerji tüketen daha az sayıda küme başkanı nedeniyle, toplam enerjiyi biraz daha yüksekte tutmaktadır. Ancak, KB'lerin enerji tüketimi, daha düşük enerji seviyelerinde genel ağ enerjisi üzerinde daha belirgin bir etki yarattığı için, ağın ömrü, düşük veya yüksek eşik seviyelerinin kullanımına kıyasla önemsiz değişiklikler göstermektedir.



Şekil 21. BS ağın merkezinde olduğunda toplam enerjinin değişimi

Şekil 22, BS ağdan uzakta konumlandırıldığında ağın toplam enerjisinin değişimini göstermektedir. Denklem (42) ile elde edilen eşik değerler, Şekil 21’de görüldüğü gibi daha uzun ağ ömrü sağlamaktadır. Alıcının ağın merkezinde konumlandığı durumlar için, AHP yöntemiyle elde edilen eşik değerlerinin ortalaması olan tek bir eşik değeri kullanmak, ağ ömrünü önemli ölçüde iyileştirmektedir. Öte yandan, tek eşik değeri kullanmak, Şekil 21’de görüldüğü gibi, AHP yöntemiyle elde edilen eşik değerlerini kullanmakla neredeyse aynı performansı sergilemektedir. Bu ortalama eşik değerini ağ için optimum eşik değeri olarak kullanmak mümkün olabilir.

Olası enerji ve konum bilgilerine göre AHP yöntemiyle elde edilen eşik değerlerinin ortalaması alınarak bulunan eşik değeri, 0.1 ile 0.9 arasında 0.1 adımlarla bulunan olası eşik değerleri ile karşılaştırılmış ve sonuçlar Tablo 10’de gösterilmiştir.



Şekil 22. BS ağın uzağında olduğunda toplam enerjinin değişimi

Tablo 10. Kalan enerji düzeyi kriterine göre ikili karşılaştırma matrisi

Denklem (41) BS konumu (50,50)		Denklem (42) BS konumu (50,50)		Sabit eşik BS konumu (50,50)	
Durum	Ağ ömrü	BS'ye ulaşan paket sayısı	Ağ ömrü	BS'ye ulaşan paket sayısı	Sabit Eşik Değeri
1	3016	91769.16	3006	58711.71	0.1
2	3025	89991.56	3142	58822.77	0.2
3	3000	88228.63	3050	61468.4	0.3
4	3505	101252.98	3280	60951.56	0.4
5	3450	99214.21	3423	63046.93	0.5
6	3542	96425.57	3385	65919.37	0.6
7	3821	107523.29	3712	62399.49	0.7
8	3800	105223.16	3785	64647.32	0.8
9	3818	102940.18	3713	67850.22	0.9
Ort.	3441.889	98063.19333	3388.444	62646.41889	
Std	329.6366	6499.655506	279.2431	2913.173971	

Denklem (41) BS konumu (200,200)		Denklem (42) BS konumu (200,200)		Sabit eşik BS konumu (200,200)	
Durum	Ağ ömrü	BS'ye ulaşan paket sayısı	Ağ ömrü	BS'ye ulaşan paket sayısı	Sabit Eşik Değeri
1	549	5384.27	3004	4951.78	0.1
2	557	5357.29	2509	4954.54	0.2
3	633	5327.84	2010	5009.7	0.3
4	792	5333.2	3796	4820.51	0.4
5	933	5358.57	3604	4854.12	0.5
6	1255	5326.66	3601	4874.78	0.6
7	855	5323.97	4148	4742.83	0.7
8	1032	5325.03	4279	4722.7	0.8
9	1253	5308.59	3938	4837.22	0.9
Ort.	873.2222	5338.38	3432.111	4863.131111	
Std	255.7172	22.16030836	725.2539	91.04012881	

Tablo 11. Simülasyon durumlarına ait detaylar

Durum	1	2	3	4	5	6	7	8	9
KB seçim periyodu (p_g)	100	100	100	150	150	150	200	200	200
Önem derecesi ($C(q)$)	7	5	3	7	5	3	7	5	3
Eşiklerin ortalaması Denklem 42, (200,200)	0.3287	0.3405	0.3631	0.3337	0.3478	0.3673	0.3466	0.3551	0.3758
Eşiklerin ortalaması Denklem 41, (200,200)	0.796	0.7775	0.7469	0.7974	0.7822	0.7483	0.7966	0.7828	0.7508
Eşiklerin ortalaması Denklem 42, (50,50)	0.2269	0.2512	0.2976	0.2281	0.2572	0.3007	0.2366	0.2638	0.3111
Eşiklerin ortalaması Denklem 41, (50,50)	0.7660	0.7486	0.7178	0.7721	0.7564	0.7254	0.7795	0.7616	0.7303

Baz istasyonu ağın merkezinde konumlandığında, Denklem (41) kullanılarak yapılan simülasyon sonuçları, Denklem (42)'ye göre biraz daha yüksek ortalama ağ ömrü vermiştir. Ancak, Denklem (41) kullanıldığında BS'ye ulaşan paketlerin ortalama sayısı, Denklem (42)'ye göre önemli ölçüde daha fazladır. Denklem (41) kullanıldığında eşik değerleri daha yüksek olduğu için daha fazla küme başkanı olacaktır. Bu durumda, üye düğümlerin küme başkanlarını kendilerine yakın bulma olasılığı daha yüksektir. Ayrıca, bazı KB'ler baz istasyonuna nispeten yakın olduğundan, bu KB'ler erken ölmemiş, enerji tasarrufu sağlamış ve üye düğümler daha fazla paketi bu KB'ler üzerinden iletebilmiştir.

Denklem (42) kullanıldığında, düşük eşik değerleri daha az sayıda KB'ye neden olmuştur. Bu durumda, bazı KB üye düğümleri uzakta kalmış, bu da düğümlerin erkenden ölümlerine BS'ye ulaşan paket sayısında azalmaya yol açmıştır. BS ağdan uzakta konumlandığında, Denklem (41) kullanıldığı ağda daha fazla KB bulunur ve KB'ler BS'ye nispeten uzak olduğundan erken ölürler. Denklem (42) kullanıldığında, daha az sayıda KB ağ ömrünün uzamasına olanak sağlar. Ancak, Denklem (41) için ağ ömrü Denklem (42)'den daha az olmasına rağmen, baz istasyonuna ulaşan paket sayısı daha fazladır. Bunun nedeni, Denklem (42) için daha az sayıda KB'nin üye düğümlerden uzak kalmasıdır. Bu nedenle, üye düğümler hızlı bir şekilde ölmüş ve alıcı istasyona gönderilen toplam paket sayısı düşmüştür. BS istasyon ağın merkezinde olduğunda ve Denklem (41) kullanıldığında, Durum 7 hem en iyi ağ ömrünü (3821) hem de BS'ye ulaşan maksimum paket sayısını (107523,29) verir. Durum 7, KB seçim periyodunun (p_g) 200 ve önem derecesinin ($C(q) = 7$) olduğunu ve bu parametrelere karşılık gelen ortalama eşik değerinin 0.7795 olduğunu

gösterir. En kötü durum, KB seçim periyodunun ($p_g = 100$) ve önem derecesinin ($C(q) = 3$) olduğu Durum 3 tarafından üretilmiştir.

Denklem (42) kullanıldığında ve baz istasyonu ağın merkezinde olduğunda, KB seçim periyodunun ($p_g = 200$) ve önem derecesinin ($C(q) = 5$) olduğu Durum 8, en uzun ağ ömrünü vermiş ve ağ 3785 tur boyunca hayatta kalabilmiştir. Aynı baz istasyonu konumu için sabit eşik değeri kullanıldığında, en iyi ağ ömrü 0.3 eşik değeri ile sağlanmış ve ağ 4771 tur boyunca hayatta kalabilmiştir. Ancak, sabit eşik değeri 0.9 olduğunda, baz istasyonuna ulaşan paket sayısının maksimum olduğu görülmüştür (136264.65).

Bunun yanında önerilen yöntem LEACH'in ardılı olan LEACH-DCHS yöntemiyle de kıyaslanmıştır. Buna göre LEACH yönteminde ağ ömrü 1410 tur iken LEACH DCHS'de 2203, önerilen yöntemde ise 3158 olmuştur. Bu durum Tablo 12'de gösterilmiştir.

Tablo 12. Önerilen yöntemin ağ ömrü bakımından LEACH ve LEACH DCHS ile kıyaslanması

	Yöntemler		
	LEACH	LEACH DCHS	Önerilen LEACH-AHP
Ağ Ömrü (Döngü sayısı)	1410	2203	3158

Ağ ömrü karşılaştırmasında kullanılan bir başka ölçüt de ilk ölen düğümle ilişkilidir. Dolayısıyla enerji tasarruflu bir yaklaşımda ilk düğümün geç ölmesi beklenir. Aşağıda Tablo 13'te önerilen yöntemle diğer yöntemlerin ilk ölen düğümlerinin döngü sayısı verilmiştir. Buna göre önerilen yöntemde ilk ölen düğüm 140 tur hayatta kalmayı başarabilmiştir.

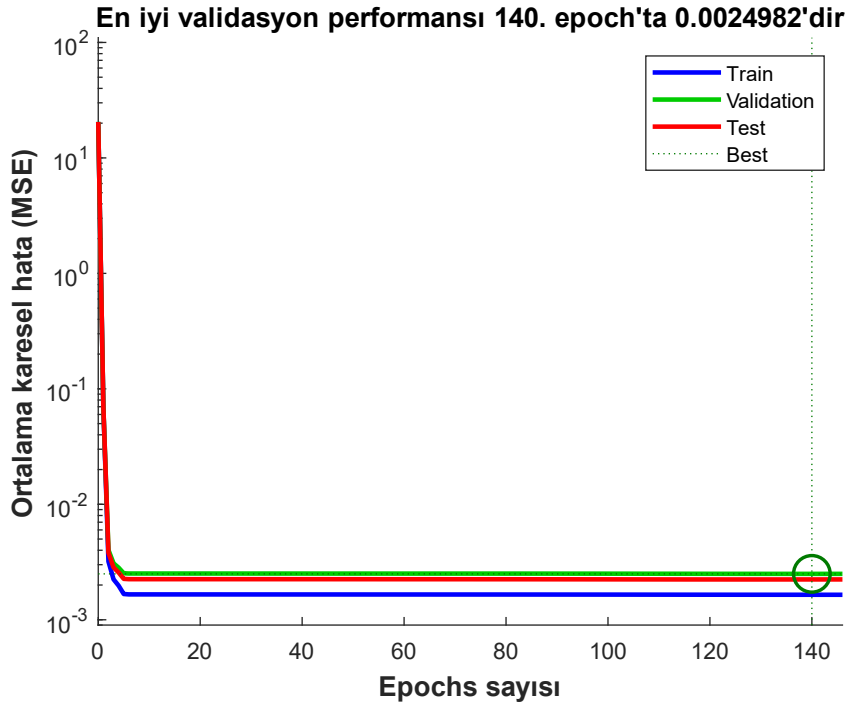
Tablo 13. İlk ölen düğümlerin döngü sayıları

	Yöntemler		
	LEACH	LEACH DCHS	Önerilen LEACH-AHP
İlk Ölen Düğüm (Döngü Sayısı)	79	44	140

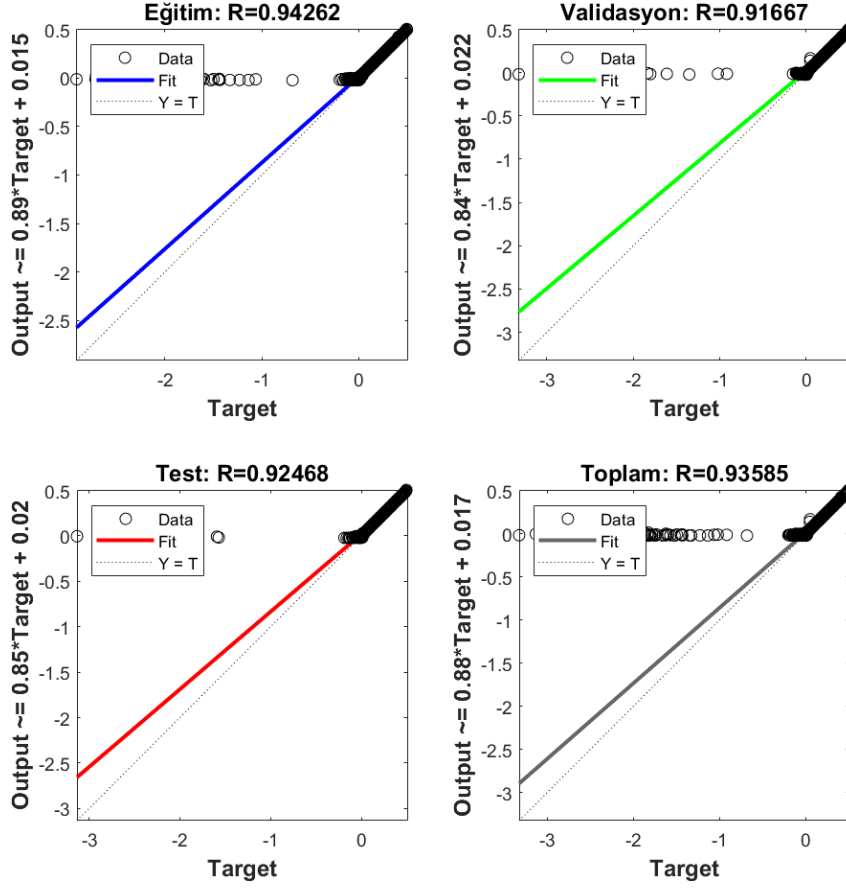
3.2. YSA Destekli Küme Başkanı Seçim Yöntemine Dair Bulgular

Dağıtık LEACH AHP Yönteminde olduğu gibi bu yaklaşımda da benzetimler MATLAB ortamında gerçekleştirilmiştir. Paket boyutu benzer şekilde 2000 bit olarak alınmıştır. Düğümlerin küme başkanı seçimi için kullanılacak olası eşikleri, başlangıç enerjilerini ve kategori bilgilerini bildikleri varsayılmıştır. Diğer yöntemde olduğu gibi alıcı ve vericinin elektronik devrelerinin işlem için bit başına 50 nJ'e ($E_{elec} = 50 \text{ nJ/bit}$) ihtiyaç duyduğu, amplifikatör enerji katsayısının (E_{amp}) ise 100 pJ/bit/m²'ye eşit olduğu varsayılmıştır. Eğitim için toplam verinin %70'i, validasyon ve test için de %15'lik kısmı kullanılmıştır. Ayrıca Tablo 14'te farklı sayıda gizli katmanlarla eğitilen sinir ağları için test edilen performans ölçütleri verilmiştir.

Şekil 23'te her gizli katman 5 nöron içerdiğinde ağın eğitim performansını göstermektedir. Buna göre, ağ 140 epoch boyunca eğitilmiş ve 0.0024982 ortalama karesel hata (MSE) değeri ile en iyi doğrulama performansı elde edilmiştir. Ayrıca, Şekil 24'teki regresyon grafiği incelendiğinde, veriler ile ağın çıktısı arasında en az 0,91667'lik bir korelasyon katsayısı (R) olduğu görülmektedir. Önerilen yöntem, eğitilmiş kaskat sinir ağı kullanılarak düğüm konumlarının Şekil 16'da gösterildiği KAA'ya uygulanmıştır.



Şekil 23. 5-5-5 Gizli katmanlı YSA'nın validasyon performansı



Şekil 24. 5-5-5 Gizli katmanlı sinir ağına ait regresyon grafikleri

Tablo 14. Farklı gizli katmanlara sahip YSA'nın performans ölçütleri

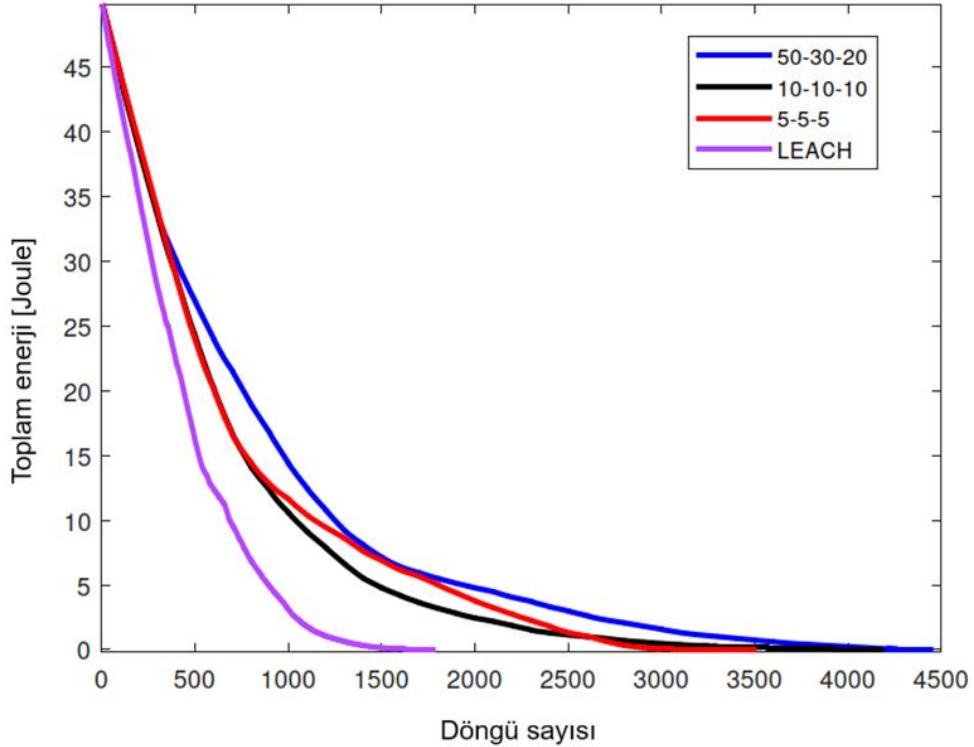
	5-5-5 Nöron	10-10-10 Nöron	50-30-20 Nöron
RMSE	0.0432	0.0423	0.0433
R-Kare	0.8758	0.8808	0.8753
MAPE	1.6028	2.8694	2.3022

Şekil 25'te, önerilen yöntemin toplam enerjisinin ilk turlardan son tura kadar LEACH'in toplam enerjisini aştığı görülmektedir. YSA yöntemindeki farklı gizli katmanlar ve en iyi sonuçları verdiği düşünülen kaskat yöntemi test edilmiş ve LEACH ile karşılaştırılmıştır. Şekil 26'dan gizli katmanlarda daha fazla sayıda nöron bulunan ağların

düğümüleri daha uzun süre canlı tutabildiği görülebilir. Bu nedenle, kalan enerjiyi (E_{remain}) en üst düzeye çıkarma hedefine daha fazla nörona sahip gizli katmanlar kullanılarak daha iyi ulaşılmaktadır. Ayrıca, gizli katmanlardaki nöron sayısından bağımsız olarak, düğümlerin %40'ının 1500 tur civarında hayatta kaldığı görülmektedir.

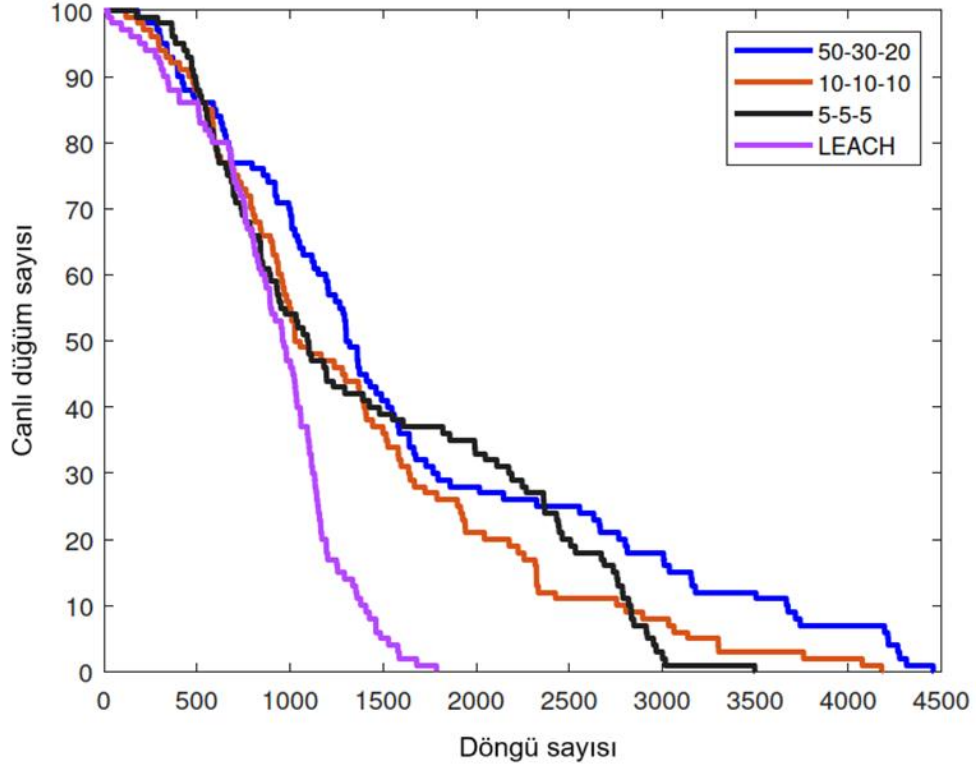
Şekil 26 ve Şekil 27 gizli katmanlarında 50-30-20 nöron bulunan YSA'nın 4457 tur hayatta kaldığını ve toplam 85318 paketi alıcıya ilettiğini gösterir. 10-10-10 nöron ile eğitilen YSA 4180 tur boyunca hayatta kalmış ve toplam 96420 paketi BS'ye iletmıştır. 5-5-5 nöronlarla eğitilen YSA 3497 tur hayatta kalmış ve toplam 96757 paketi BS'ye iletmıştır.

LEACH algoritması ise aynı koşullar altında 1773 tur boyunca hayatta kalmış ve toplam 61766 paketi BS'ye iletmıştır. Buna göre, önerilen yöntemin varyasyonları hem toplam paketler hem de ağ ömrü açısından LEACH algoritmasını geçmiştir. Ancak düğümlerin sınırlı işlem gücüne sahip olduğu düşünüldüğünde, daha az işlem gücü gerektiren girdi, gizli ve çıktı katmanlarının 5-5-5 olduğu durumun seçilmesinin daha elzem olduğu düşünülmektedir.



Şekil 25. Kalan enerjinin döngü sayısına göre değişimi

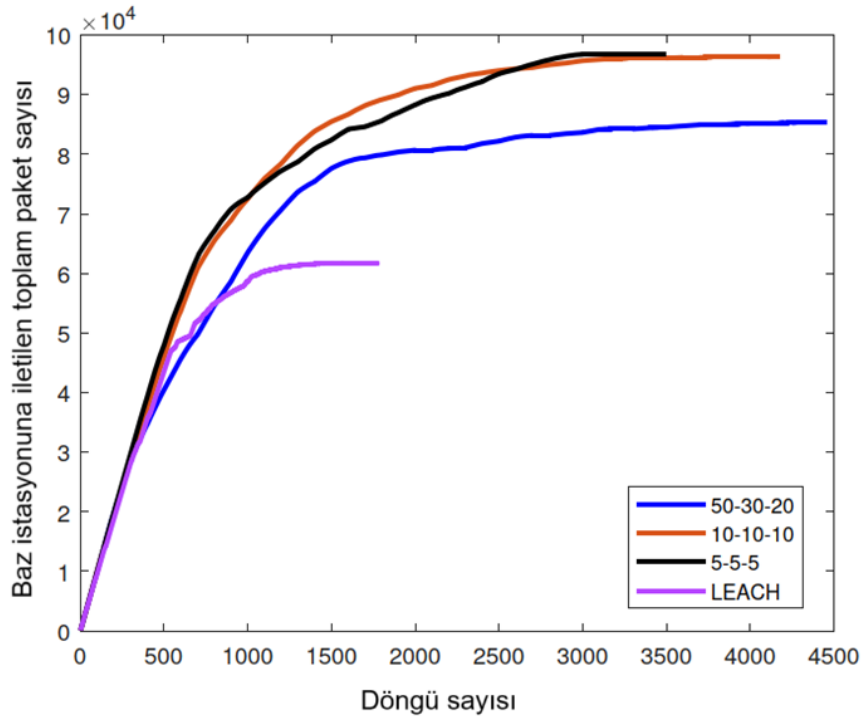
Buna ek olarak, ortalama eşikler incelendiğinde, Şekil 28'de BS'ye en yakın kategorideki düğümlerin başlangıçta nispeten yüksek olan (0,8) ortalama eşiklerinin bir süre sonra düştüğü görülmektedir. Bu durum, BS'ye yakın oldukları için enerjilerini belirli bir süre korudukları, ancak enerjileri azaldıkça ağ ömrünü uzatmak için eşik ortalamalarını düşürdükleri şeklinde yorumlanabilir. Benzer durum Kategori 2 için de geçerlidir.



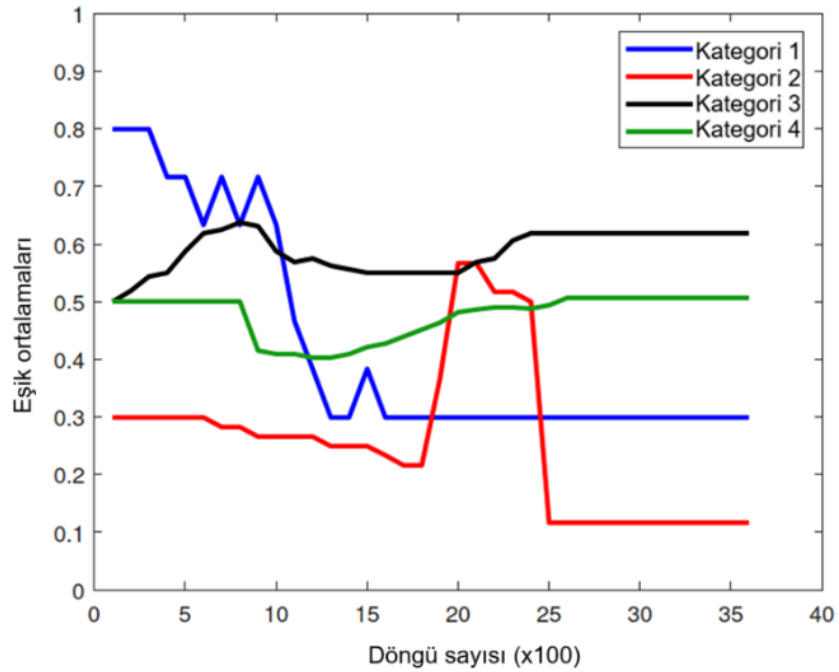
Şekil 26. Hayatta kalan düğümlerin döngü sayılarına göre değişimi

Ancak Kategori 3 ve 4 için eşik ortalamaları nispeten fazla değişmemiştir. Bu kategoriler BS'ye en uzak kategoriler olduğundan, diğer kategorilere kıyasla daha fazla düğüm erken ölmektedir. Bu durum normalde enerji verimliliğini sağlamak için başlangıçtaki yüksek eşik değerlerinin düşürülmesini gerektirse de, çok sayıda düğümün ölmesi ve düğümlerin enerjisinin azalması, küme başkanı seçimini kolaylaştırmak için eşik değerinin düşürülememesine neden olmaktadır.

Şekil 29, BS'ye nispeten yakın düğümlerin (Kategori 1 ve 2) daha uzaktaki düğümlerden (Kategori 3 ve 4) daha enerji verimli olduğunu göstermektedir.

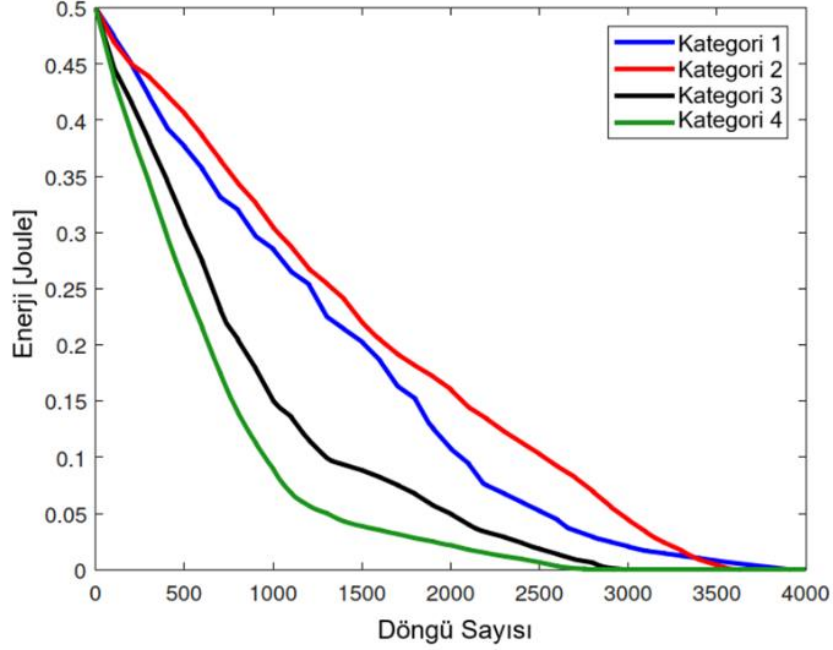


Şekil 27. BS'ye iletilen toplam paket sayısının döngü sayısına göre değişimi



Şekil 28. Döngü sayısına göre eşik ortalamalarının değişimi

YSA destekli KB seçim yöntemi dağıtık yapıdadır ve KB olup olmama durumu düğümlerde belirlenir. Önerilen yöntemde, her biri 5 nörona sahip üç gizli katmanlı kaskat YSA ile elde edilen sonuçlar LEACH yöntemine kıyasla önemli bir performans artışı göstermiştir.



Şekil 29. Farklı kategorilere ait enerji tüketimi

YSA Destekli Küme Başkanı Seçim Yöntemi ile ilgili olarak, literatürde Kablosuz Algılayıcı Ağlar (KAA) üzerine enerji etkin küme başkanı seçim yöntemlerini ele alan çalışmalara dair Tablo 14'te sunulan araştırmalar dikkate alınarak, bu makalelerde kullanılan parametreler ile aynı parametreler kullanılarak simülasyonlar yeniden gerçekleştirilmiştir. Değerlendirme, son düğüm ölene kadar geçen tur sayısına (LND) göre yapılmıştır. Ayrıca, sonuçların değerlendirilmesinde adaleti sağlamak için, özellikle LEACH'e göre elde edilen performansa ilişkin karşılaştırmalar yapılmıştır. Analizlerde, her bir çalışmanın performansı LEACH'e göre hesaplanmış ve önerilen yöntem, her bir çalışmanın simülasyonlarında belirlenen parametrelere göre ayrı ayrı çalıştırılmıştır. Ardından, önerilen yöntemin LEACH'e kıyasla performansı, her bir çalışmada belirtilen belirli parametreler göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar son sütunda belirtilmiştir. Bulgular,

önerilen yöntemin benzer çalışmalardan 3,63 ile 6,26 arasında değişen bir faktörle daha iyi performans gösterdiğini göstermiştir.

Tablo 15. Son çalışmalarla önerilen yöntemin performans analizi

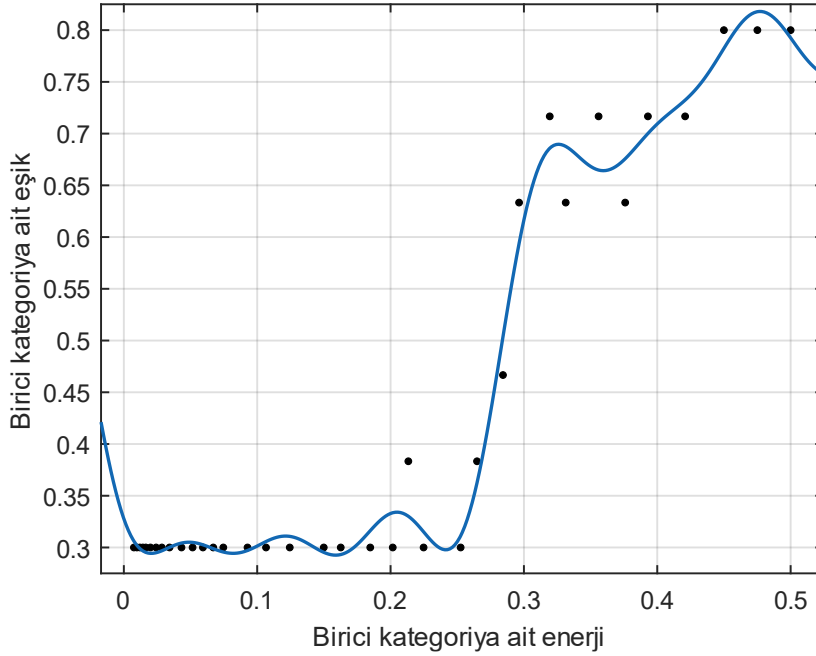
İlgili Çalışma	Düğüm Sayısı	Alan [m ²]	E _{init} [J]	E _{elec} [nJ/bit]	Paket boyutu [bits]	LEACH'e göre gelişme oranı [%]	Önerilen yöntemin LEACH'e göre gelişme oranı [%]
Wang ve diğerleri, (2020)	100	100*100	0.5	50	4000	85.9	313.2
Pour ve Javidan, (2021)	100	70*70	0.5	50	4000	32.9	288
Nezha ve diğerleri, (2021)	100	100*100	0.5	50	4000	50	313.2
Wu ve diğerleri, (2022)	100	100*100	0.5	50	4000	69.3	322.1
Gulbas ve Cetin, (2023)	100	100*100	0.5	50	4000	81.5	313.2
Debasis ve diğerleri, (2023)	100	100*100	5	TD	800+160	31.25	313.2

3.2.1. YSA Verilerini Kullanarak Eğri Uydurmaya Dair Bulgular

Bu bölümde YSA verileri kullanılarak ağ ömrü ile eşik değeri değişiminin MATLAB ortamında eğri uydurma fonksiyonundan yararlanılmıştır. Her kategoriye ait enerji ile eşik değeri arasındaki değişim çizdirilmiş ve bu eğriye en iyi uyan denklem göz önüne alınmıştır. Daha açık bir ifadeyle dört adet kategoriye ait kalan enerjileri ile ilişkili dört denklem atanmıştır. Örneğin birinci kategoriye ait düğümün denklemine mevcut enerjisi girildiğinde o düğümün hangi eşik değeri üretmesi gerektiği hesap sonucu ortaya çıkmış olmaktadır. Bu durum eğitilmiş sinir ağının her düğümün belleğinde saklanması zorunluğunu ortadan kaldıracığından dikkate değerdir. Eğri uydurma ile birlikte elde edilen sonuçlar orijinal YSA ile kıyaslanarak yorumlanmıştır.

Buna göre Şekil 30’da birinci kategoriye ait düğümlerin YSA ile elde edilen veriler ışığında eşik-enerji ilişkisi verilmiştir. Bu veriler MATLAB Curve Fitting Toolbox ile sınanmış ve regresyon modellerinden en iyi sonucu veren toplamsal sinüs kullanılmıştır. Karşılık gelen ifade Denklem (48)’de verilmiştir.

$$T_1 = 6.923 \cdot \sin(5.441 \cdot E + 0.777) + 6.654 \cdot \sin(5.822 \cdot E + 3.873) + 0.039 \cdot \sin(50.89 \cdot E - 1.981) + 0.022 \cdot \sin(70.58 \cdot E - 1.008) + 0.061 \cdot \sin(32.26 \cdot E + 3.599) \quad (48)$$

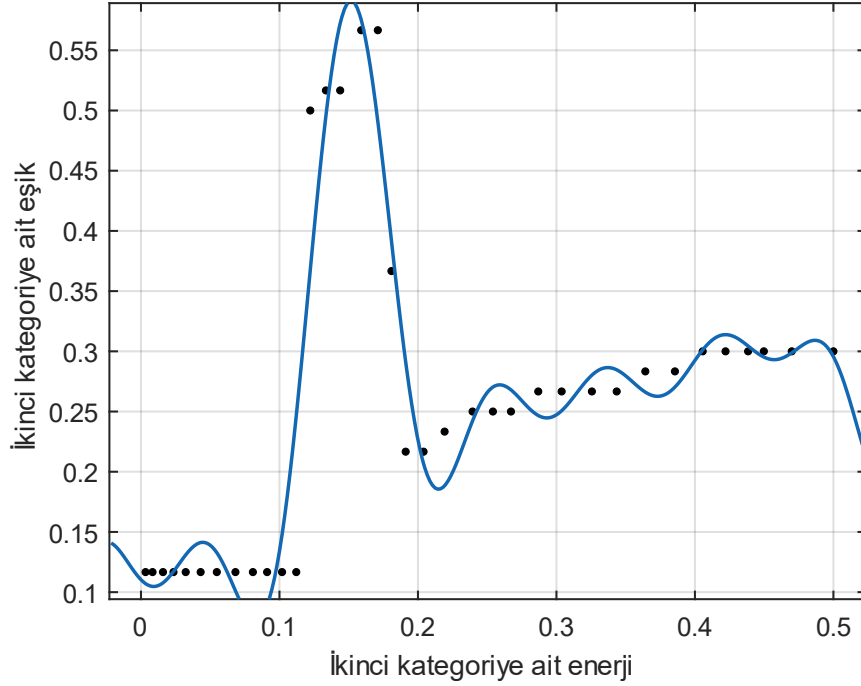


Şekil 30. Birinci kategoriye ait eşik-enerji eğrisi

Birinci kategori, BS’ye en yakın kategorideki düğümleri içermektedir. Dolayısıyla enerjinin küçük değerlerinde (0.25 J ve altı) eşik değerleri 0.3-0.35 civarında seyretmektedir. Düğümün enerjisi 0.3 J üzerinde ise eşik değeri 0.65-0.8 değerlerine kadar çıkmaktadır. Enerji fazlayken düğümlerden daha çok küme başkanı seçilmesi, enerji azken de düğümlerden daha az küme başkanı seçilmesi, mantıklı ve izah edilebilir bir durumdur.

Benzer şekilde YSA destekli küme başkanı seçim yönteminin verileri kullanılarak ikinci kategori düğümlerine ilişkin eşik-enerji eğrisi Şekil 31’de verilmiştir. İkinci kategori düğümlerinin eşik-enerji denklemi toplamsal sinüsle aşağıdaki şekilde elde edilmiştir:

$$T_2 = 1.546 \cdot \sin(5.346 \cdot E - 0.809) + 0.09 \cdot \sin(28.84 \cdot E - 3.281) + 1.275 \cdot \sin(6.488 \cdot E + 1.904) + 0.092 \cdot \sin(40.13 \cdot E + 2.064) + 0.059 \cdot \sin(56.36 \cdot E - 0.771) + 0.0426 \cdot \sin(69.14 \cdot E - 2.428) \quad (49)$$

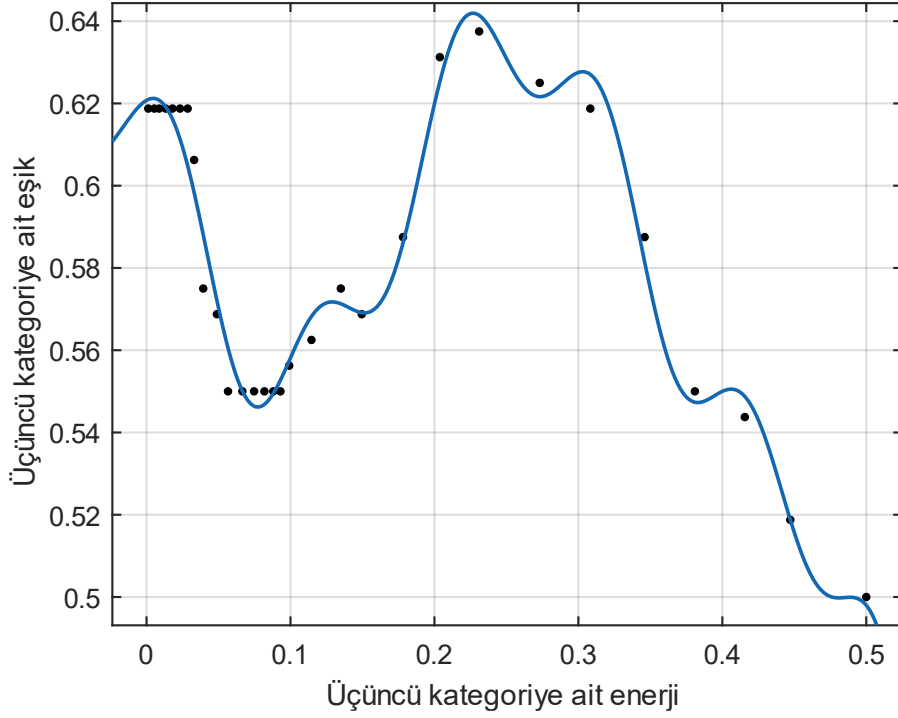


Şekil 31. İkinci kategoriye ait eşik-enerji eğrisi

İkinci kategorideki düğümlerde enerji seviyesi 0.5 ile 0.2 J arasındayken eşik değerleri gitgide azalarak 0.3'ten 0.2'ye kadar düşmüştür. Enerji seviyesi 0.2 ile 0.1 J arasındayken eşik değerlerinde 0.55'e varan artış olmuştur. Eşik değerlerinin gitgide azalması küme başkanı seçimini zorlaştırdığından, bu ani artış küme başkanı seçimini kolaylaştırmak için olduğu düşünülebilir.

Üçüncü kategoriye ait düğümlere ilişkin aynı işlemler uygulandığında elde edilen eşik-enerji grafiği aşağıda Şekil 32’de verilmiştir. Bu verilere en iyi uyan regresyon modeli yine toplamsal sinüs olup denklemi aşağıdaki gibidir:

$$T_3 = 1.016 \cdot \sin(5.645 \cdot E + 0.274) + 1.057 \cdot \sin(11.83 \cdot E + 1.897) + 0.677 \cdot \sin(13.91 \cdot E + 4.486) + 0.013 \cdot \sin(63.29 \cdot E + 0.326) \quad (50)$$



Şekil 32. Üçüncü kategoriye ait eşik-enerji eğrisi

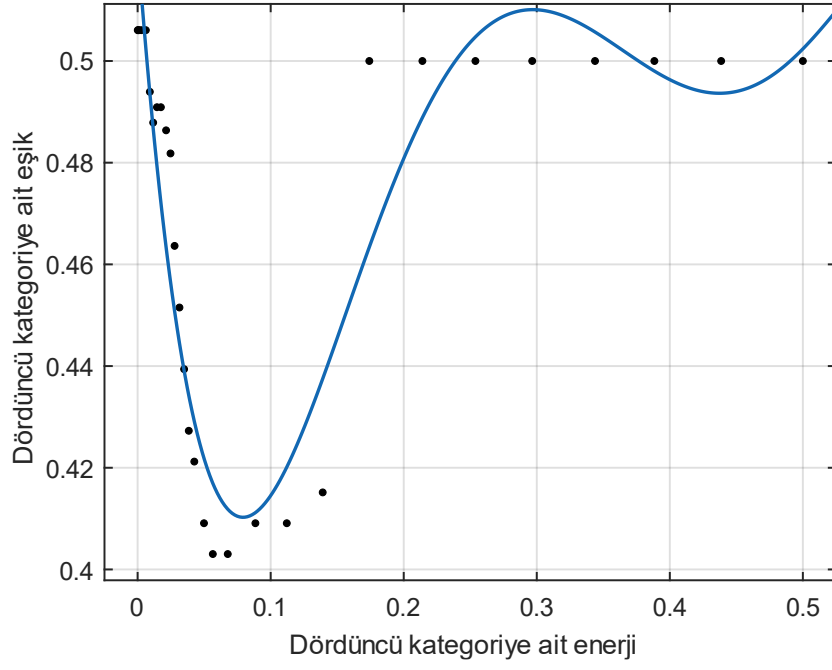
Dördüncü kategori düğümlerine ilişkin eşik-enerji grafiği aşağıda Şekil 33'te verilmiştir. İlgili şekil incelendiğinde düşümlerin enerjisi yaklaşık 0.2 Joule ve üzerindeyken eşik değerlerinin 0.5 düzeyinde seyrettiği görülür. Bununla beraber enerji seviyesi 0.1 J düzeyine indiğinde eşik de 0.41 düzeyine çekildiği görülür. Enerji daha da düştükçe eşik gitgide yükselir. Dördüncü kategorinin BS'ye en uzak düğümlerden oluştuğu unutulmamalıdır. Dolayısıyla düğümlerin özellikle uzakta olması küme başkanının enerji tüketimini hayli artırır bu yüzden eşik daha az küme başkanı oluşturmak için düşer.

Bu verilere en uygun regresyon modeli diğer üç modelden farklı olarak polinomsal model olmuştur. Ancak enerji düzeyi çok küçük olduğunda eşik seviyesi 1 seviyesine vardığından denklemin verebileceği en yüksek 0.9 ile sınırlandırılmıştır.

Dördüncü kategoriye karşılık gelen enerji eşik ilişkisi aşağıda Denklem (51)'de verilmiştir. Denklemleri tanımlanan T_1 , T_2 , T_3 ve T_4 ifadeleri 4 kategoriye ait eşik

değerlerini ve denklemlerde geçen E değeri de ilgili düğümün o andaki enerji düzeyini temsil eder.

$$T_4 = -113.8 \cdot E^5 + 199.3 \cdot E^4 - 126.4 \cdot E^3 + 34.37 \cdot E^2 - 3.441 \cdot E + 0.5225 \quad (51)$$



Şekil 33. Dördüncü kategoriye ait eşik-enerji eğrisi

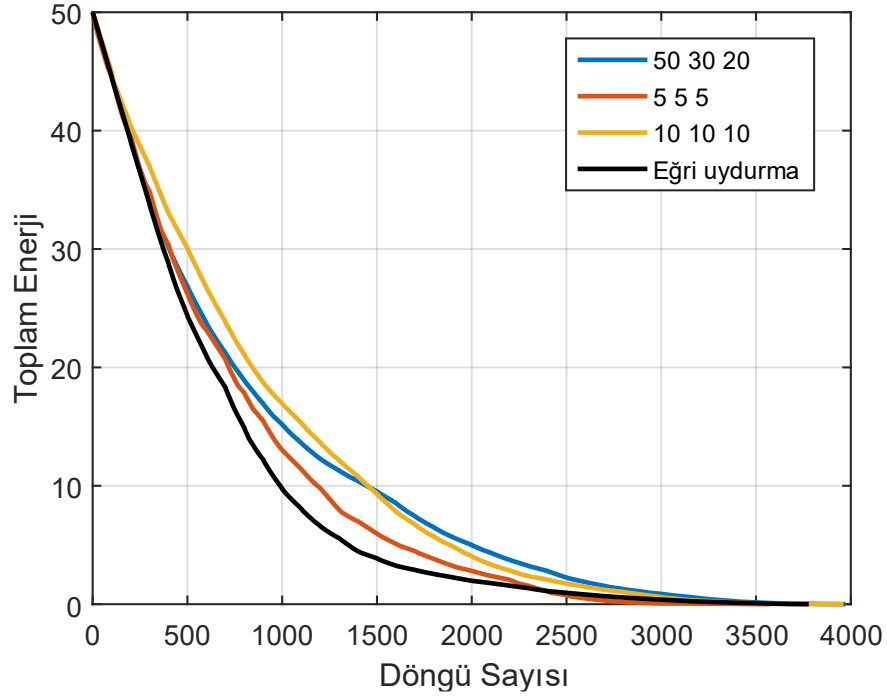
Eğri uydurma fonksiyonlarına ait performans ölçütleri Tablo 15’te verilmiştir.

Tablo 16. Eğri uydurma fonksiyonlarına ait performans ölçütleri

	T₁	T₂	T₃	T₄
SSE	0.01797	0.05964	0.0009086	0.005413
R-Kare	0.9857	0.9084	0.9771	0.8784
Düzeltilmiş R-Kare	0.9762	0.8218	0.9631	0.853
RMSE	0.02926	0.05756	0.007105	0.01502

Sonuç olarak dört kategoriye ilişkin enerji eşik denklemleri YSA verileri kullanılarak eğri uydurma yoluyla belirlenmiştir. Bu denklemler sayesinde herhangi bir düğüm, enerji ve kategori değerine göre eşik değerini denklem üzerinden hesaplar.

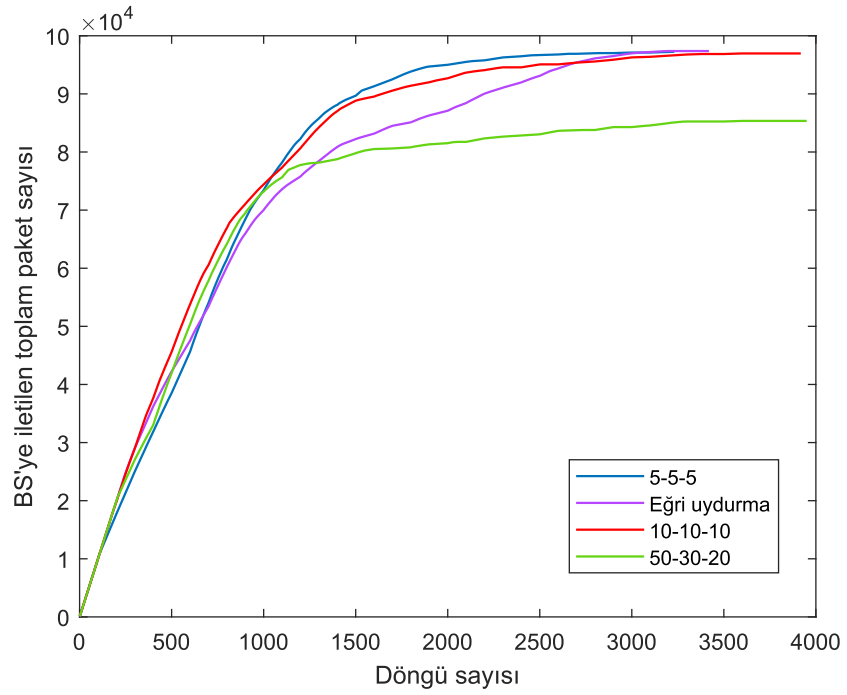
Yukarıda verilen dört denklem kullanılarak aynı şartlarda benzetim tekrar yapılmış ve sonuçları YSA'lı modelle kıyaslanmıştır. Buna göre eğri uydurma ile elde edilen enerji-döngü sayısı Şekil 34'te verilmiştir.



Şekil 34. YSA destekli rotalama yöntemiyle eğri uydurmalı yöntemin toplam enerji-döngü sayısı bakımından karşılaştırılması

Eğri uydurma ile elde edilen toplam enerji-döngü sayısı değişimi incelendiğinde gizli katmanlarında 5'er nöron kullanan YSA'lı yaklaşıma göre düğümlerin daha hızlı enerji kaybettikleri görülür. Örneğin 500 döngüden sonra toplam enerjideki azalma belirginleşmektedir. Ancak yine de ilgili yöntemi kullanan ağ 3000 döngü hayatta kalmayı başarmıştır. Dolayısıyla küme başkanı seçimi için gerek işlem yükünün azlığı gerekse de merkezi bir işleme ihtiyaç duymuyor oluşu bu yöntemin avantajları olarak görülebilir.

YSA'lı küme başkanı seçim yöntemine dair paket sayısı bulgularıyla eğri uydurma yönteminin paket sayısı bulgularının karşılaştırılması Şekil 35'te verilmiştir. Buna göre eğri uydurma yöntemi üzerinden BS'ye iletilen toplam paket sayısı 97372 iken 5-5-5 nöronlu YSA'nın ise 97246'dır. Ayrıca 10-10-10 ve 50-30-20 nöronlu YSA yönteminin ağ ömrü daha uzun olsa da BS'ye iletilen toplam paket sayısı bakımından daha kötü sonuç üretmiştir. Bunun sebebi optimizasyonun ağ ömrüne göre yapılmış olmasıdır. Bu sonuçlar ışığında eğri uydurmalı yöntem hem paket sayısı hem de ağ ömrü bakımından oldukça olumlu sonuçlar üretebilmiştir.



Şekil 35. YSA destekli rotalama yöntemiyle eğri uydurmalı yöntemin toplam paket sayısı bakımından karşılaştırılması

4. SONUÇLAR

Doktora tezi olarak sunulan bu çalışmada KAA'larda enerji verimliliğini sağlamayı hedefleyen iki yöntem önerilmiştir. Bunlardan birincisi Dağıtık LEACH-AHP yöntemidir. İkincisi ise YSA destekli kümelemeli yöntemdir. Her iki yöntem de ayrıntılı şekilde değerlendirilerek yorumlanmıştır.

Dağıtık LEACH-AHP çalışmasında, AHP yönteminin uygulanması yoluyla düğümler için BS'ye olan mesafe ve enerji seviyelerine dayalı optimum eşik değerlerini belirlemeyi amaçlayan hiyerarşik ve dağıtık bir kümeleme algoritması tanıtılmıştır. Bir düğümün KB olma olasılığının belirlenmesi, enerji ve mesafenin belirli önem seviyeleri atanmış kriter olarak dikkate alınmasını içerir. Birincil amaç, çeşitli çevrimdışı senaryolar için eşik değerlerini (yani, düğümlerin KB olma olasılığını) önceden hesaplamak ve daha sonra bu değerleri ilgili durumlarda uygulamaktır. Önerilen algoritma, etkinliğini belirlemek için yerleşik LEACH algoritmasına göre değerlendirilmiştir. Sonuçlar, önerilen algoritmanın LEACH'i iki katı aşan bir ağ ömrü ve BS'ye gönderilen paketlerde ek %50 artışla geride bırakarak önemli ölçüde daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Ek olarak, önerilen algoritma ile daha yüksek işlem gücüyle bilinen merkezi KMHPSO algoritması arasında karşılaştırmalı bir analiz yürütülmüştür. Önerilen yöntem, AHP yöntemiyle çevrimdışı olarak elde edilen bir eşik değerleri matrisinden yararlanarak, hesaplama açısından verimli bir algoritma geliştirmeyi amaçlamaktadır (Gangal, Cinemre, & Hacıoglu, 2024).

YSA Tabanlı Küme Başkanı Seçim Yönteminde KAA'larda küme başkanlarını (KB) seçmek için YSA tabanlı dağıtık bir yaklaşım sunulmuştur. Önerilen metodoloji, geleneksel LEACH yöntemiyle ve bu alandaki son çalışmalardan bazılarıyla karşılaştırıldığında performansta önemli bir gelişme sergilemiştir. Önerilen yaklaşımın kaskat-YSA'yı eğitmek için bir veritabanı gerektirdiğini belirtmekte fayda vardır. Bu veritabanı simülasyonlar yoluyla veya fiziksel bir ağdan elde edilebilir. Ek olarak, bu yöntemde yer alan düğümler, YSA için gerekli hesaplamaları yapmak için yeterli işleme kaynaklarına sahip olmalıdır. Dahası, gelecekteki çalışmalarda, YSA'ya güvenmeden düğümlerin mevcut enerji seviyeleriyle ilgili kategorilerin ortalama eşik değerlerinden yararlanmak mümkün olabilir. Bu, bilinen uzaklık aralıklarının BS'ye analiz edilmesiyle araştırılabilir ve bu da önerilen yöntemin kesin düğüm konumlarının bilinmesini gerektirmeden genelleştirilmesine olanak

tanır. Dahası, önerilen yöntem, düğüm konumlarının sabit ve bilindiği ağlara, örneğin uzaktan sayaç okuma uygulamalarına etkili bir şekilde uygulanabilir.

YSA destekli küme başkanı seçim yönteminin bir uzantısı olarak YSA verileri kullanılarak eşik-enerji eğrileri elde edilmiştir. BS'ye olan uzaklıklarına göre düğümleri 4 kategori bulunduğundan 4 ayrı eşik enerji eğrisi elde edilmiştir. Bu eğrilere MATLAB Curve Fitting Toolbox kullanılarak en uygun denklemler uydurulmuş ve test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre eğri uydurma içeren yöntem ağ ömrü bakımından YSA'lı yöntemin gerisinde fakat yakın çıktılar üretmiştir. Düğümlerin, sinir ağını saklamadan ve basit bir işlemle çevrimdışı olarak eşik değerlerini hesaplayabilmesi dikkat çekicidir.



5. ÖNERİLER

Doktora tezi olarak sunulan bu çalışmada, KAA'larda enerji tüketimini azaltıp ağ ömrünü artırmayı amaçlayan iki yaklaşım geliştirilmiştir. Bu tez konusu ile çalışma yapmak isteyen araştırmacılara ve uygulayıcılara iletmek istenen öneriler aşağıdaki gibi belirtilmiştir:

- Dağıtık LEACH-AHP yönteminde kriterlerden olan enerji ve uzaklığın yanında düğüme ait başka parametreler de eklenerek verimliliğin artırılması denenebilir.
- Her iki yaklaşımda da birinci dereceden radyo modeli kullanılmıştır. Bu modelde yüzey yansıması, kanal koşulları ve sensör biriminin harcadığı enerji gibi faktörler dikkate alınmamaktadır. Her ne kadar literatürde ekseriyetle bu yöntem kullanılsa da (LEACH ve türevleri dahil) daha karmaşık modeller kullanılabilir.
- Gelecek çalışmalarında, simülasyon verileri yerine gerçek fiziksel ağlardan elde edilen verilerin kullanımı araştırılabilir. Bu, modelin gerçek dünya uygulamalarındaki başarısını daha iyi test edilmesine olanak tanır.

6. KAYNAKLAR

- Abdulzahra, A. M., & Al-Qurabat, A. M. (2024). An Energy-Efficient Clustering Protocol for the Lifetime Elongation of Wireless Sensors in IoT Networks. M. H. Bakar, T. A. Razak, & A. Öchsner içinde, *IT Solutions for Sustainable Living*. Springer.
- Akkaya, K., & Younis, M. (2005). A survey on routing protocols for wireless sensor networks. *Ad hoc networks*, s. 325-349.
- Akyildiz, I. F., & Vuran, M. C. (2010). *Wireless sensor networks*. John Wiley & Sons.
- Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., & Cayirci, E. (2002). A survey on sensor networks. *IEEE Communications magazine*, 40(8), s. 102-114.
- Ali, A., Jadoon, Y. K., Changazi, S. A., & Qasim, M. (2020). Military operations: Wireless sensor networks based applications to reinforce future battlefield command system. *2020 IEEE 23rd International Multitopic Conference (INMIC)* (s. 1-6). IEEE.
- Al-Karaki, J. N., & Kamal, A. E. (2004). *IEEE wireless communications*, 11(6), s. 6-28.
- Al-Shalabi, M., Anbar, M., Wan, T.-C., & Khasawneh, A. (2018). Variants of the low-energy adaptive clustering hierarchy protocol: Survey, issues and challenges. *Electronics*, 7(8).
- An, S.-H., Kim, G.-H., & Kang, K.-I. (2007). A case-based reasoning cost estimating model using experience by analytic hierarchy process. *Building and Environment*, 42(7), s. 2573-2579.
- Bagwari, A., Tomar, G. S., Bagwari, J., Barbosa, J. L., & Sastry, M. K. (2023). *Advanced Wireless Communication and Sensor Networks: Applications and Simulations*. CRC Press.
- Barth, M., Boriboonsomsin, K., & Vu, A. (2007). Environmentally-friendly navigation. *2007 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference* (s. 684-689). IEEE.
- Basak, I. (2002). On the use of information criteria in analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, 141(1), s. 200-216.
- Batra, P. K., & Kant, K. (2016). LEACH-MAC: a new cluster head selection algorithm for Wireless Sensor Networks. *Wireless Networks*, 22, s. 49-60.
- Beale, M. H., Hagan, M. T., & Demuth, H. B. (2010). Neural network toolbox 7. *User's Guide, MathWorks*, 2.
- Behera, T. M., & Mohapatra, S. K. (2021). A novel scheme for mitigation of energy hole problem in wireless sensor network for military application. *International Journal of Communication Systems*, 34(11).

- Beiranvand, Z., Patooghy, A., & Fazeli, M. (2013). I-LEACH: An efficient routing algorithm to improve performance & to reduce energy consumption in Wireless Sensor Networks. *The 5th Conference on information and knowledge technology* (s. 13-18). IEEE.
- Bhat, A. W., & Passi, A. (2022). Wireless sensor network motes: A comparative study. *2022 9th International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)* (s. 141-144). IEEE.
- Borz, I., Palade, T., Puschita, E., Dolea, P., & Pastrav, A. (2020). Wireless sensor networks for healthcare monitoring. *International Conference on Advancements of Medicine and Health Care through Technology* (s. 232-239). Springer.
- Braginsky, D., & Estrin, D. (2002). Rumor routing algorithm for sensor networks. *Proceedings of the 1st ACM international workshop on Wireless sensor networks and applications*, (s. 22-31).
- Cao, D., Leung, L. C., & Law, J. S. (2008). Modifying inconsistent comparison matrix in analytic hierarchy process: A heuristic approach. *Decision Support Systems*, 44(4), s. 944-953.
- Chang, Y., Tang, H., Li, B., & Yuan, X. (2017). Distributed joint optimization routing algorithm based on the analytic hierarchy process for wireless sensor networks. *IEEE Communications Letters*, 21(12), s. 2718-2721.
- Chen, W., Chen, L., Chen, Z., & Tu, S. (2006). Wits: A wireless sensor network for intelligent transportation system. *First International Multi-Symposiums on Computer and Computational Sciences (IMSCCS'06)* (s. 635--641). IEEE.
- Cheung, S. Y., Coleri, S., Dundar, B., Ganesh, S., Tan, C.-W., & Varaiya, P. (2005). Traffic measurement and vehicle classification with single magnetic sensor. *Transportation research record*, 1917(1), s. 173-181.
- Cheung, S. Y., Ergen, S. C., & Varaiya, P. (2005). Traffic surveillance with wireless magnetic sensors. *Proceedings of the 12th ITS world congress*.
- Chou, T.-Y., Hsu, C.-L., & Chen, M.-C. (2008). A fuzzy multi-criteria decision model for international tourist hotels location selection. *International journal of hospitality management*, 27(2), s. 293-301.
- Chowdhury, M. A., & Sadek, A. W. (2003). *Fundamentals of intelligent transportation systems planning*. Artech House Publishing.
- Christin, D., Reinhardt, A., Mogre, P. S., & Steinmetz, R. a. (2009). Wireless sensor networks and the internet of things: selected challenges. *Proceedings of the 8th GI/ITG KuVS Fachgespräch Drahtlose sensornetze*, s. 31-34.
- Daanoune, I., Abdennaceur, B., & Ballouk, A. (2011). A comprehensive survey on LEACH-based clustering routing protocols in Wireless Sensor Networks. *Ad Hoc Networks*.

- Dargie, W., & Poellabauer, C. (2010). *Fundamentals of wireless sensor networks: theory and practice*. John Wiley & Sons.
- Debasis, K., Sharma, L. D., Bohat, V., & Bhadoria, R. S. (2023). An energy-efficient clustering algorithm for maximizing lifetime of wireless sensor networks using machine learning. *Mobile networks and applications*, 28(2), s. 853-867.
- Dey, N., Ashour, A. S., Shi, F., Fong, S. J., & Sherratt, R. S. (2017). Developing residential wireless sensor networks for ECG healthcare monitoring. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 63(4), s. 442-449.
- Dissanayake, D. T., Senanayake, S., Divarathne, H., & Samaranayake, B. (2009). Real-time dynamic traffic light timing adaptation algorithm and simulation software. *2009 International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)* (s. 563-567). IEEE.
- Elahi, A., & Cushman, A. (2023). *Computer Networks: Data Communications, Internet and Security*. Springer Nature.
- Fahmy, H. M. (2020). *Concepts, applications, experimentation and analysis of wireless sensor networks*. Springer Nature.
- Fahmy, H. M. (2023). *Concepts, applications, experimentation and analysis of wireless sensor networks* (Third Edition b.). Springer Nature.
- Gangal, V., Cinemre, I., & Hacıoglu, G. (2024). *A distributed leach-ahp routing for wireless sensor networks*. IEEE Access.
- García-Cascales, M. S., & Lamata, M. T. (2009). Selection of a cleaning system for engine maintenance based on the analytic hierarchy process. *Computers & Industrial Engineering*, 56(4), s. 1442-1451.
- García-Hernández, C., Ibarguengoytia-Gonzalez, P., García-Hernández, J., & Pérez-Díaz, J. (2007). Wireless sensor networks and applications: a survey. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, 7(3), s. 264-273.
- GhasemAghaei, R. (2008). *Routing in wireless sensor networks: An ant-inspired approach*. Doctoral dissertation, University of Ottawa (Canada).
- Gnanambigai, J., Rengarajan, D. N., & Anbukkarasi, K. (2012). Leach and its descendant protocols: A survey. *International Journal of Communication and Computer Technologies*, 1(3), s. 15-21.
- Graupe, D. (2013). *Principles of artificial neural networks*. World Scientific.
- Gülbaş, G., & Çetin, G. (2023). Lifetime optimization of the leach protocol in wsns with simulated annealing algorithm. *Wireless Personal Communications*, 132(4), s. 2857-2883.
- Güngör, V. Ç., & Hancke, G. P. (2013). *Industrial wireless sensor networks: Applications, protocols, and standards*. Crc Press.

- Hamami, L., & Nassereddine, B. (2020). Application of wireless sensor networks in the field of irrigation: A review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 179.
- Handy, M., Haase, M., & Timmermann, D. (2002). Low energy adaptive clustering hierarchy with deterministic cluster-head selection. *4th international workshop on mobile and wireless communications network* (s. 368-372). IEEE.
- Haykin, S. (2009). *Neural networks and learning machines*, 3/E. Pearson Education India.
- He, T., Krishnamurthy, S., Luo, L., Yan, T., Gu, L., Stoleru, R., . . . Stankovic, J. A. (2006). Vigilnet: An integrated sensor network system for energy-efficient surveillance. *ACM Transactions on Sensor Networks (TOSN)*, 2(1), s. 1-38.
- Heinzelman, W. B., Chandrakasan, A. P., & Balakrishnan, H. (2002). An application-specific protocol architecture for wireless microsensor networks. *IEEE Transactions on wireless communications*, 1(4), s. 660-670.
- Heinzelman, W. R., Chandrakasan, A., & Balakrishnan, H. (2000). Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks. *Proceedings of the 33rd annual Hawaii international conference on system sciences*. 10. IEEE.
- Heinzelman, W., Kulik, J., & Balakrishnan, H. (1999). Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks. *Proceedings of the 5th annual ACM/IEEE international conference on Mobile computing and networking*, (s. 174-185).
- Huang, Y., Tang, B., Deng, L., & Zhao, C. (2020). Fuzzy analytic hierarchy process-based balanced topology control of wireless sensor networks for machine vibration monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 20(15), s. 8256-8264.
- IEEE 802.15 Work Group and others. (2006). Part 15.4: wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (LR-WPANs). *ANSI/IEEE Std, 802(4)*.
- Intanagonwiwat, C., Govindan, R., & Estrin, D. (2000). Directed diffusion: A scalable and robust communication paradigm for sensor networks. *Proceedings of the 6th annual international conference on Mobile computing and networking*, (s. 56-67).
- Ishizaka, A., & Lusti, M. (2006). How to derive priorities in AHP: a comparative study. *Central European Journal of Operations Research*, s. 387-400.
- Jain, A. K., Mao, J., & Mohiuddin, K. M. (1996). Artificial neural networks: A tutorial}. *Computer*, 29(3), s. 31-44.
- Jo, H.-S., Park, C., Lee, E., Choi, H. K., & Park, J. (2020). Path loss prediction based on machine learning techniques: Principal component analysis, artificial neural network, and Gaussian process. *Sensors*, 20(7), s. 1927.
- Johnson, D. B., & Maltz, D. A. (1996). Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. *Mobile computing*, s. 153-181.

- Jolly, V., & Latifi, S. (2006). Comprehensive Study of Routing Management in Wireless Sensor Networks-Part-I. *ICWN*, (s. 37-44).
- Kandris, D., Nakas, C., Vomvas, D., & Koulouras, G. (2020). Applications of wireless sensor networks: an up-to-date survey. *Applied system innovation*, 3(1), s. 14.
- Karaboga, D., & diğerleri. (2005). *An idea based on honey bee swarm for numerical optimization*. Technical report-tr06, Erciyes university, engineering faculty, computer engineering.
- Karl, H., & Willig, A. (2007). *Protocols and architectures for wireless sensor networks*. John Wiley & Sons.
- Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. *Proceedings of ICNN'95-international conference on neural networks*. 4, s. 1942-1948. IEEE.
- Khalifeh, A., Mazunga, F., Nechibvute, A., & Nyambo, B. M. (2022). Microcontroller unit-based wireless sensor network nodes: A review. *Sensors*, 22(22).
- Khoa, T. A., Man, M. M., Nguyen, T.-Y., Nguyen, V., & Nam, N. H. (2019). Smart agriculture using IoT multi-sensors: a novel watering management system. 8(3).
- Kobo, H. I., Abu-Mahfouz, A. M., & Hancke, G. P. (2017). A survey on software-defined wireless sensor networks: Challenges and design requirements. *IEEE access*, 5, s. 1872-1899.
- Kulik, J., Heinzelman, W., & Balakrishnan, H. (2002). Negotiation-based protocols for disseminating information in wireless sensor networks. *Wireless networks*, 8, s. 169-185.
- Kulkarni, U. M., Kulkarni, D. V., & Kenchannavar, H. H. (2017). Neural network based energy conservation for wireless sensor network. *2017 International Conference On Smart Technologies For Smart Nation (SmartTechCon)* (s. 1312-1316). IEEE.
- Kumar, K., & Thakur, G. S. (2012). Advanced applications of neural networks and artificial intelligence: A review. *International journal of information technology and computer science*, 4(6), s. 57-68.
- Kumar, K., & Thakur, G. S. (2012). Advanced applications of neural networks and artificial intelligence: A review. *International journal of information technology and computer science*, 4(6), s. 57-68.
- Kurt, S., & Tavli, B. (2017). Path-Loss Modeling for Wireless Sensor Networks: A review of models and comparative evaluations. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 59(1), s. 18-37.
- Landaluce, H., Arjona, L., Perallos, A., Falcone, F., Angulo, I., & Muralter, F. (2020). A review of IoT sensing applications and challenges using RFID and wireless sensor networks. *Sensors*, 20(9).

- Lédeczi, Á., Nádas, A., Völgyesi, P., Balogh, G., Kusy, B., Sallai, J., . . . Simon, G. (2005). Countersniper system for urban warfare. *ACM Transactions on Sensor networks (TOSN)*, 1(2), s. 153-177.
- Li, X.-Y. (2008). *Wireless ad hoc and sensor networks: theory and applications*. Cambridge University Press.
- Lindsey, S., & Raghavendra, C. S. (2002). PEGASIS: Power-efficient gathering in sensor information systems. *Proceedings, IEEE aerospace conference*. 3. IEEE.
- Liu, J., Zhao, Z., Ji, J., & Hu, M. (2020). Research and application of wireless sensor network technology in power transmission and distribution system. *Intelligent and Converged Networks*, 1(2), s. 199-220.
- Liu, J.-L., & Ravishankar, C. V. (2011). LEACH-GA: Genetic algorithm-based energy-efficient adaptive clustering protocol for wireless sensor networks. *International Journal of Machine Learning and Computing*, 1(1).
- Liu, Y. (2012). Wireless sensor network applications in smart grid: recent trends and challenges. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 8(9).
- Mahamuni, C. V., & Jalauddin, Z. M. (2021). Intrusion monitoring in military surveillance applications using wireless sensor networks (WSNs) with deep learning for multiple object detection and tracking. *2021 International Conference on Control, Automation, Power and Signal Processing (CAPS)* (s. 1-6). IEEE.
- McCulloch, W. S., & Pitts, W. (1943). A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. *The bulletin of mathematical biophysics*.
- Mehta, A. J., Mehta, H. A., Manjunath, T., & Ardil, C. (2008). A multi-layer artificial neural network architecture design for load forecasting in power systems. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 5(2), s. 207-220.
- Mehta, D., & Saxena, S. (2022). Hierarchical WSN protocol with fuzzy multi-criteria clustering and bio-inspired energy-efficient routing (FMCB-ER). *Multimedia Tools and Applications*, 81(24), s. 35083-35116.
- Milici, S., Lazaro, A., Villarino, R., Girbau, D., & Magnarosa, M. (2018). Wireless wearable magnetometer-based sensor for sleep quality monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 18(5), s. 2145-2152.
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in engineering software*, 69, s. 46-61.
- Modares, H., Salleh, R., & Moravejosharieh, A. (2011). Overview of security issues in wireless sensor networks. *2011 third international conference on computational intelligence, modelling & simulation*, s. 308-311.
- Moorthy H., R., Bangera, V., Amrin, Z., Avinash, N., & Rao N.S., K. (2020). WSN in defence field: A security overview. *2020 Fourth International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud)(I-SMAC)* (s. 258-264). IEEE.

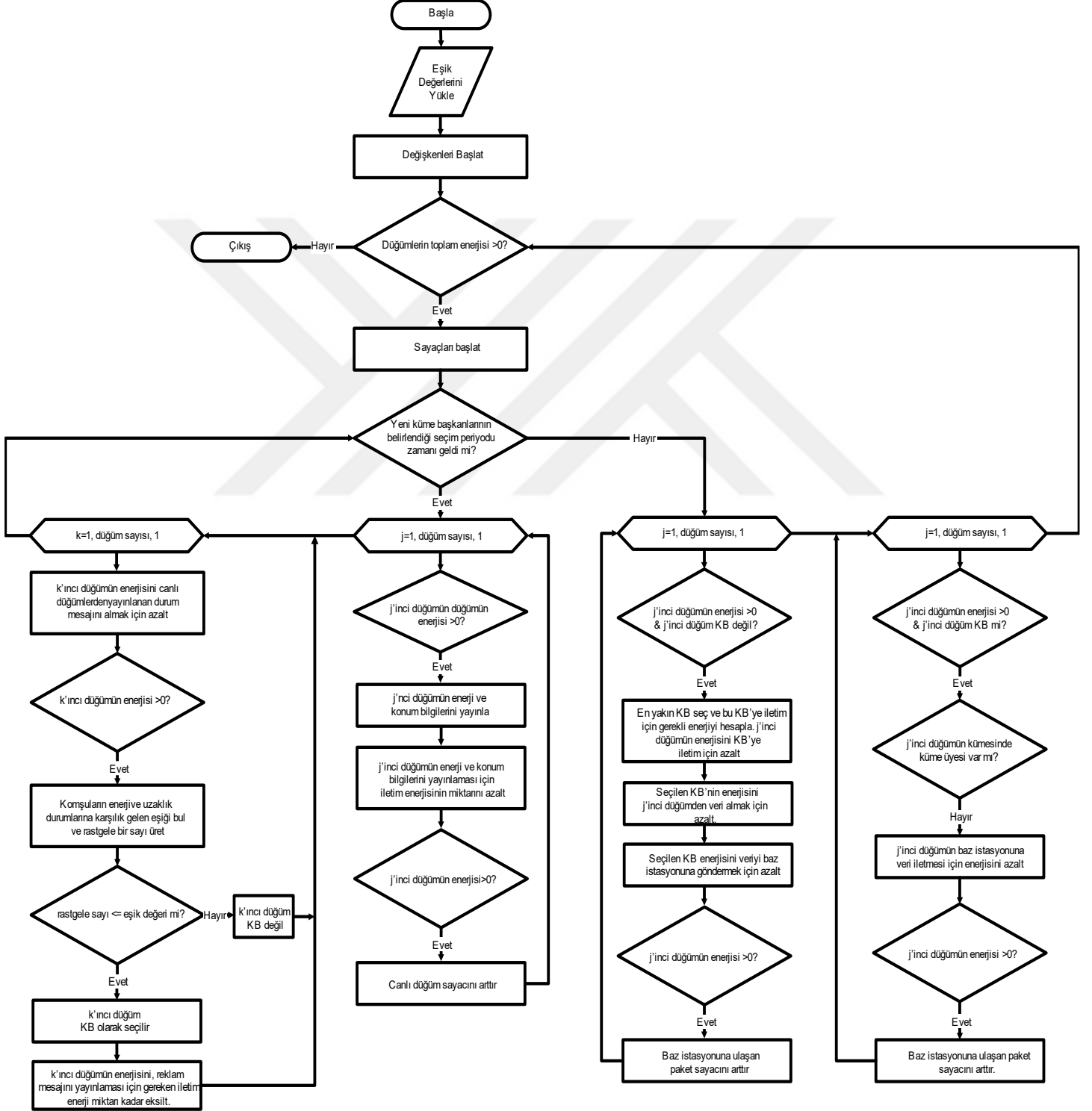
- Nezha, E. I., Abdellah, N., & diğerleri. (2021). Energy-aware clustering and efficient cluster head selection. *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, 14(1), s. 1-15.
- Nielsen, F. (2001). {Neural Networks algorithms and applications. *Niels Brock Business College*.
- Nigam, G. K., & Dabas, C. (2021). ESO-LEACH: PSO based energy efficient clustering in LEACH. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 33(8), s. 947-954.
- Othman, M. F., & Shazali, K. (2012). Wireless sensor network applications: A study in environment monitoring system. *Procedia Engineering*, 41, s. 1204-1210.
- Öztemel, E. (2003). *Yapay Sinir Ağları*. Istanbul: Papatya Yayıncılık.
- Pantazis, N. A., Nikolidakis, S. A., & Vergados, D. D. (2012). Energy-efficient routing protocols in wireless sensor networks: A survey. *IEEE Communications surveys & tutorials*, 15(2), s. 551-591.
- Pathak, A., Al-Anbagi, I., & Hamilton, H. J. (2022). An adaptive QoS and trust-based lightweight secure routing algorithm for WSNs. *IEEE Internet of Things Journal*, 9(23), s. 23826-23840.
- Perkins, C., Belding-Royer, E., & Das, S. (2003). *Ad-Hoc On-Demand Distance Vector Routing*. 6 15, 2024 tarihinde <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc3561.html> adresinden alındı
- Pour, S. E., & Javidan, R. (2021). A new energy aware cluster head selection for LEACH in wireless sensor networks. *IET Wireless Sensor Systems*, 11(1), s. 45-53.
- Pragadeswaran, S., Madhumitha, S., & Gopinath, S. (2021). Certain investigation on military applications of wireless sensor network. *International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology*, 3(1), s. 14-19.
- Prasanna, S., & Rao, S. (2012). An overview of wireless sensor networks applications and security. (Citeseer, Dü.) *International Journal of Soft Computing and Engineering*, 2(2), s. 2231-2307.
- Prashanth, G., & Manjunatha, P. (2023). Cluster based energy efficient routing protocol for heterogeneous wireless sensor networks. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 35(21).
- Qichen, W. (2022). Research progress on wireless sensor network (WSN) security technology. *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing.
- Roy, N. R., & Chandra, P. (2020). Energy dissipation model for wireless sensor networks: a survey. *International Journal of Information Technology*, 12(4), s. 1343-1353.
- Saaty, T. L. (1982). The analytic hierarchy process: A new approach to deal with fuzziness in architecture. *Architectural Science Review*, 25(3), s. 64-69.

- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International journal of services sciences*, 1(1), s. 83-98.
- Sasikala, A., Sangameswaran, N., Aravindh, P., & others. (2015). Improving the energy efficiency of LEACH protocol using VCH in wireless sensor network. *Int. J. Eng. Dev. Res*, 3(2), s. 918-924.
- Sharma, H., Haque, A., & Blaabjerg, F. (2021). Machine learning in wireless sensor networks for smart cities: a survey. *Electronics*, 10(9), s. 1012.
- Sharmin, S., Ahmedy, I., & Md Noor, R. (2023). An energy-efficient data aggregation clustering algorithm for wireless sensor Networks using hybrid PSO. *Energies*, 16(5).
- Shi, S., Liu, X., & Gu, X. (2012). An energy-efficiency Optimized LEACH-C for wireless sensor networks. *{7th international conference on communications and networking in China}* (s. 487-492). IEEE.
- Shyama, M., & Pillai, A. S. (2018). Fault Tolerance strategies for Wireless Sensor Networks – A Comprehensive Survey. *2018 3rd International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)*, (s. 707-711).
- Singh, S. K., Kumar, P., & Singh, J. P. (2017). A survey on successors of LEACH protocol. *IEEE Access*, 5, s. 4298-4328.
- Sohrabi, K., Gao, J. a., & Pottie, G. (2000). Protocols for self-organization of a wireless sensor network. *IEEE Personal Communications*, 7(5), s. 16-27.
- Srivastava, A., & Mishra, P. K. (2023). Energy efficient clustering using modified PROMETHEE-II and AHP approach in wireless sensor networks. *Multimedia Tools and Applications*, 82(30), s. 47049-47080.
- Suzuki, K. (2011). *Artificial neural networks: methodological advances and biomedical applications*. BoD-Books on Demand.
- Tereshko, V., & Loengarov, A. (2005). Collective decision making in honey-bee foraging dynamics. *Computing and information systems*, 9(3).
- Tubaishat, M., Qi, Q., Shang, Y., & Shi, H. (2008). Wireless sensor-based traffic light control. *2008 5th IEEE Consumer Communications and Networking Conference* (s. 702-706). IEEE.
- Tubaishat, M., Shang, Y., & Shi, H. (2007). Adaptive traffic light control with wireless sensor networks. *2007 4th IEEE Consumer Communications and Networking Conference* (s. 187-191). IEEE.
- Ullah, A., Khan, F. S., Mohy-Ud-Din, Z., Hassany, N., Gul, J. Z., Khan, M., . . . Rehman, M. M. (2024). A Hybrid Approach for Energy Consumption and Improvement in Sensor Network Lifespan in Wireless Sensor Networks. *Sensors*, 24(5), s. 1353.

- Varman, S. A., Baskaran, A. R., Aravindh, S., & Prabhu, E. (2017). Deep learning and IoT for smart agriculture using WSN. *2017 IEEE International Conference on Computational Intelligence and Computing Research (ICIC)* (s. 1-6). IEEE.
- Venugopal, K., Shiv Prakash, T., & Kumaraswamy, M. (2020). *QoS Routing Algorithms for Wireless Sensor Networks*. Springer.
- Wang, A., Heinzelman, W. B., Sinha, A., & Chandrakasan, A. P. (2001). Energy-scalable protocols for battery-operated microsensor networks. *Journal of VLSI signal processing systems for signal, image and video technology*, s. 223-237.
- Wang, L., & Xiao, Y. (2006). A survey of energy-efficient scheduling mechanisms in sensor networks. *Mobile Networks and Applications*, 11, s. 723-740.
- Wang, Z., Ding, H., Li, B., Bao, L., & Yang, Z. (2020). An energy efficient routing protocol based on improved artificial bee colony algorithm for wireless sensor networks. *IEEE access*, 8.
- Werner-Allen, G., Lorincz, K., Ruiz, M., Marcillo, O., Johnson, J., Lees, J., & Welsh, M. (2006). Deploying a wireless sensor network on an active volcano. *IEEE internet computing*, 10(2), s. 18-25.
- Wu, J.-X., Huang, P.-T., Li, C.-M., & Lin, C.-H. (2018). Bidirectional hetero-associative memory network with flexible sensors and cloud computing for blood leakage detection in intravenous and dialysis therapy. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence*, 2(4), s. 298-307.
- Wu, M., Li, Z., Chen, J., Min, Q., & Lu, T. (2022). A dual cluster-head energy-efficient routing algorithm based on canopy optimization and K-means for WSN. *Sensors*, 22(24).
- Yılmaz, M. (2010). Analitik Hiyerarşi Süreci AHS ve Bir Uygulama: Lider bir Kütüphane Müdürü Seçimi. *Türk Kütüphaneciliği*, 24(2), s. 206-234.
- Zervopoulos, A., Tsipis, A., Alvanou, A. G., Bezas, K., Papamichail, A., Vergis, S., . . . others. (2020). Wireless sensor network synchronization for precision agriculture applications. *Agriculture*, 10(3).
- Zhang, H. a. (2016). Threshold tuning-based wearable sensor fault detection for reliable medical monitoring using Bayesian network model. *IEEE Systems Journal*, 12(2), s. 1886-1896.
- Zou, F., Yang, B., & Cao, Y. (2009). Traffic light control for a single intersection based on wireless sensor network. *2009 9th International Conference on Electronic Measurement & Instruments*. IEEE.

7. EKLER

Ek 1. Dağıtık LEACH-AHP yöntemine ait akış şeması



ÖZGEÇMİŞ

Volkan GANGAL, Lise eğitimini 2007 yılında Akçaabat Anadolu Lisesi'nde tamamladı. 2008-2009 öğretim yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik - Elektronik Mühendisliği bölümünde lisans eğitimine başladı. 2012 yılında bu bölümden mezun olarak aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim dalında tezli yüksek lisans programına başladı. 2015 yılında “Kablosuz Algılayıcı Ağlarda Karınca Koloni Algoritmali Rotalama ile Enerji Etkin Rotalamanın İncelenmesi” başlıklı yüksek lisans tezini sunmasının ardından doktora eğitimine başladı. 2014 yılında Araştırma Görevlisi olarak başladığı kariyerine, 2019 yılından itibaren Öğretim Görevlisi olarak devam etmektedir.

Gangal, V., Cinemre, I., & Hacıoglu, G. (2024). *A distributed leach-ahp routing for wireless sensor networks*. IEEE Access.